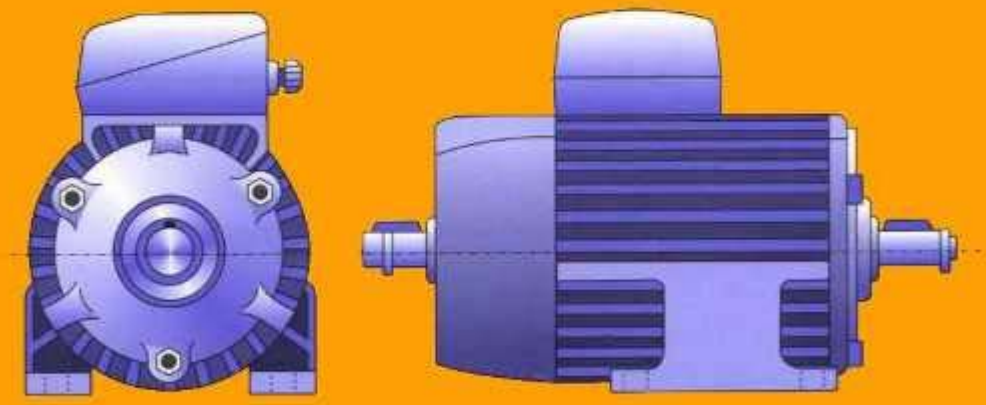
MIRCEA POPA
CONSTANȚIU POPESCU
EDY DUMBRAVĂ
OVIDIU SAMOILESCU
STELIAN POPESCU

Maşini Electrice şi Acționări



Manual pentru licee industriale cu profil de electrotehnică
clasa a XI-a şi a XII-a şi şcoli de maiştri şi de specializare postliceală

Fejes Simion

ing. Mircea Popa
ing. Constanțiu Popescu
ing. Edy Dumbravă
ing. Ovidiu Samoilescu
dr. ing. Stelian Popescu

MAȘINI ELECTRICE ȘI ACȚIONĂRI

manual pentru licee industriale cu profil de electrotehnică, clasele a XI-a și a XII-a (specializările electronist pentru automatizare, electrician pentru mașini și aparate electrice, electrician pentru centrale și rețele electrice), și pentru școli de maiștri.

Editura didactică și pedagogică
București — 1977

Partea întîi

MAŞINI ELECTRICE

— Calculul circuitelor de curent continuu.
— Calculul circuitelor de curent alternativ.
— Maşini electrice de curent continuu.
— Transformatoare electrice.
— Înfăşurările statorului maşinilor de curent alternativ.
— Cîmpurile magnetice învîrtitoare ale maşinilor de curent alternativ.
— Maşini electrice asincrone.
— Maşini electrice sincrone.

Capitolul 1

CALCULUL CIRCUITELOR DE CURENT CONTINUU

A. RECAPITULAREA NOȚIUNILOR DE ELECTROCINETICĂ, NECESARE CALCULULUI CIRCUITELOR DE CURENT CONTINUU

Legea lui Ohm. Dacă între capetele unui conductor se aplică o tensiune constantă U, curentul I din conductor este proporțional cu tensiunea aplicată și invers proporțional cu rezistența conductorului R:

$$I = \frac{U}{R}.$$

Căderea de tensiune U într-un rezistor este diferența de potențial la capetele sale, U_{AB}, produsă de trecerea curentului electric I prin rezistența rezistorului R:

$$U = U_{AB} = RI.$$

Efectul termic al curentului electric (legea lui Joule-Lenz):

$$W = RI^2t,$$

în care W este energia electrică transformată în căldură.

Puterea electrică P:

$$P = UI.$$

Legea I a lui Kirchhoff. Suma algebrică a curenților care intră într-un nod este egală cu zero:

$$\Sigma I_i = 0.$$

Legea a II-a a lui Kirchhoff. Într-un circuit închis, suma algebrică a căderilor de tensiune este egală cu suma algebrică a tensiunilor electromotoare:

$$\Sigma E = \Sigma RI.$$

B. GENERALITĂȚI ASUPRA METODELOR DE REZOLVARE A REȚELELOR ELECTRICE

A rezolva o rețea electrică înseamnă, în general, a găsi curenții în laturile rețelei, cînd se cunosc sursele și receptoarele din rețea. Metoda de calcul a curenților depinde de complexitatea rețelei. Sub acest aspect se pot distinge următoarele trei categorii de rețele și metode de calcul:

Cea mai simplă rețea electrică este un circuit conținînd o sursă cu tensiunea electromotoare E, avînd rezistența interioară r, și ca sarcină exterioară, un rezistor cu rezistența R (fig. 1.1).

Curentul debitat are sensul indicat pe figură. Scriindu-se legea a II-a a lui Kirchhoff în acest circuit, sensul de parcurs fiind sensul curentului, se obține:

$$E = RI + rI = I(R + r). \qquad (1.1)$$

De aici se deduce curentul I:

$$I = \frac{E}{R + r}. \qquad (1.2)$$

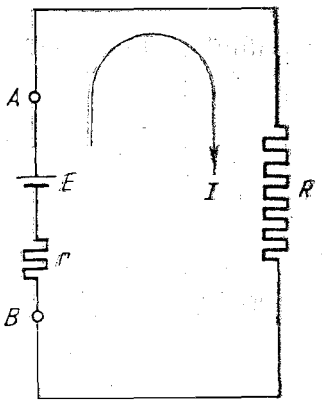


Fig. 1.1. Circuit cu o sursă și un rezistor exterior.

Cunoscîndu-se acest curent, se pot deduce celelalte mărimi care interesează, ca de exemplu:

— tensiune la borne:

$$U = U_{AB} = E - rI;$$

— puterea utilă:

$$P = UI = RI^2;$$

— randamentul:

$$\eta = \frac{UI}{EI} = \frac{U}{E}.$$

● Rețelele mai complicate se întîlnesc cînd sarcina exterioară este constituită din rezistoare montate în serie, în paralel sau mixt, sau cînd alimentarea se face de la mai multe surse identice, montate în serie, în paralel sau mixt. În toate aceste cazuri, rețeaua se poate reduce la un circuit simplu, ca în figura 1.1, prin așa-numitele *transfigurări*, astfel încît rezolvarea este, de asemenea, simplă.

● Rețelele complexe cu mai multe laturi și noduri se rezolvă prin aplicarea legilor lui Kirchhoff, sau prin metode particulare deduse pe baza acestor legi.

C. LEGAREA REZISTOARELOR ÎN SERIE, ÎN PARALEL ȘI MIXT

1. LEGAREA ÎN SERIE A REZISTOARELOR

Sarcina exterioară a unui circuit sau o latură a unei rețele complexe se compune în unele cazuri din mai multe rezistoare cu rezistențele R_1, R_2, R_3, ..., R_n, legate în serie (fig. 1.2). Rezistențele acestor rezistoare se pot înlocui cu o singură rezistență R_e, denumită *rezistență echivalentă*.

Se notează cu U tensiunea între bornele extreme ale grupului de rezistoare și cu I curentul în rezistoare. Curentul I produce în rezistoare căderile de tensiune:

$$U_1 = R_1 I;\ U_2 = R_2 I;\ \ldots;\ U_n = R_n I.$$

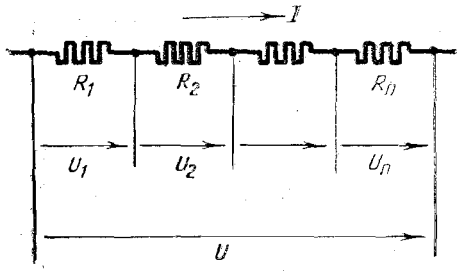


Fig. 1.2. Rezistoare legate în serie.

Suma acestor căderi de tensiune este egală cu tensiunea U, deci:

$$U = U_1 + U_2 + \ldots + U_n =$$
$$= R_1 I + R_2 I + \ldots + R_n I =$$
$$= I(R_1 + R_2 + \ldots + R_n).$$

Conform legii lui Ohm, rezistența echivalentă este egală cu raportul dintre U și I. Ținîndu-se seamă de relația de mai sus, rezultă:

$$R_e = \frac{U}{I} = \frac{I(R_1 + R_2 + \ldots + R_n)}{I} = R_1 + R_2 + \ldots + R_n$$

sau:

$$R_e = \sum_1^n R_i. \tag{1.3}$$

Deci, rezistența echivalentă a unor rezistoare legate în serie este egală cu suma rezistențelor acestor rezistoare.

2. LEGAREA ÎN PARALEL A REZISTOARELOR

Dacă mai multe rezistoare cu rezistențele $R_1, R_2 \ldots R_n$ sînt legate în paralel (fig. 1.3), rezistența echivalentă cu care se pot înlocui se calculează ținîndu-se seama că între bornele AB există aceeași tensiune U.

Rezistoarele sînt parcurse de curenții I_1, I_2,... I_n avînd același sens, de exemplu de la A la B. Acești curenți au valorile:

$$I_1 = \frac{U}{R_1}; \quad I_2 = \frac{U}{R_2}; \ldots; \quad I_n = \frac{U}{R_n}.$$

Conform legii I a lui Kirchhoff, suma acestor curenți este egală cu curentul I, care intră în nodul A:

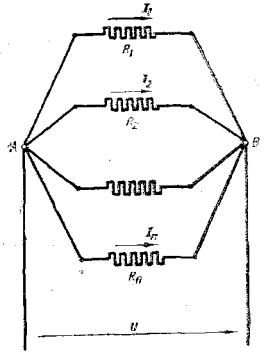


Fig. 1.3. Rezistoare legate în paralel.

$$I = I_1 + I_2 + \ldots + I_n,$$

sau:

$$I = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \ldots + \frac{U}{R_n} = U\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \ldots + \frac{1}{R_n}\right).$$

Dar $I = \frac{U}{R_e}$ și relația precedentă devine:

$$U\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \ldots + \frac{1}{R_n}\right) = \frac{U}{R_e},$$

de unde, după simplificarea cu U se obține:

$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \ldots + \frac{1}{R_n},$$

sau:

$$\frac{1}{R_e} = \sum_1^n \frac{1}{R_i}. \tag{1.4}$$

Deci, la legarea în paralel (în derivație) a unor rezistoare, inversul rezistenței echivalente este egal cu suma inverselor rezistențelor în paralel.

În cazul a două rezistoare legate în paralel, din relația (1.4) se poate deduce o relație simplă, directă, pentru rezistența echivalentă R_e:

$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2},$$

deci:

$$R_e = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}. \tag{1.5}$$

3. LEGAREA MIXTĂ A REZISTOARELOR

Dacă rezistoarele sînt legate mixt, adică grupuri de rezistoare în paralel sînt legate în serie cu alte rezistoare (fig. 1.4, *a*), rezistența echivalentă se obține din aproape în aproape: se calculează mai întîi o rezistență echivalentă R'_e pentru grupul de rezistențe în paralel (fig. 1.4, *b*), apoi se calculează rezistența echivalentă R_e pentru grupul în serie rezultat.

Analog, se rezolvă și alte moduri de legare mixtă (de exemplu, grupuri de rezistoare în serie, legate în paralel cu alte grupuri de rezistoare în serie).

D. LEGAREA SURSELOR ÎN SERIE, ÎN PARALEL ȘI MIXT

1. LEGAREA SURSELOR ÎN SERIE

Sursele se pot lega în serie, ca în figura 1.5, *a*. Notîndu-se cu $E_1, E_2, \ldots E_n$ tensiunile lor electromotoare (t.e.m.), cu $r_1, r_2, \ldots, r_n$, rezistențele lor interioare

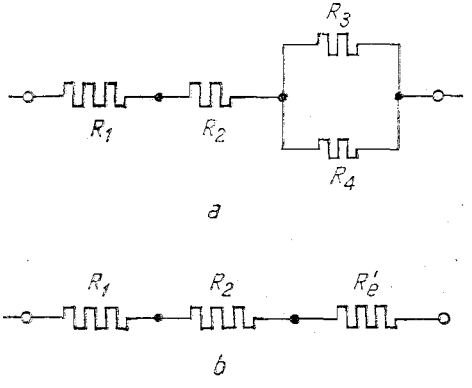


Fig. 1.4. Rezistoare legate mixt.

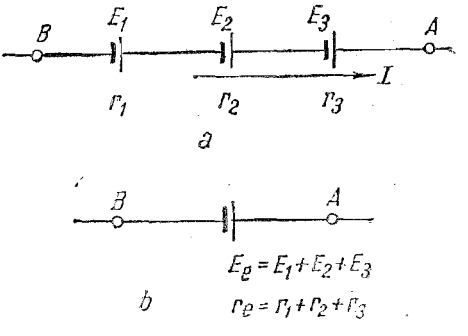


Fig. 1.5. Surse legate în serie.

și cu I curentul debitat, tensiunea între bornele A și B, conform legii a II-a a lui Kirchhoff este:

$$U_{AB} = (\Sigma E - \Sigma RI)_{B \to A} = (E_1 + E_2 + \ldots + E_n) - (r_1 I + r_2 I + \ldots r_n I).$$

Dacă se înlocuiește grupul de surse legate în serie cu o singură sursă avînd t.e.m. E_e și rezistența interioară r_e (fig. 1.5, *b*), astfel ca la debitarea aceluiași curent I să rezulte aceeași tensiune între bornele A și B, această tensiune ar avea expresia:

$$U_{AB} = E_e - r_e I.$$

Comparîndu-se cele două relații, rezultă că sursele în serie se comportă ca o singură sursă echivalentă, cu t.e.m.:

$$E_e = E_1 + E_2 + \ldots + E_n = \sum_{i=1}^{n} E_i, \tag{1.6}$$

și rezistența interioară

$$r_e = r_1 + r_2 + \ldots + r_n = \sum_{i=1}^{n} r_i. \tag{1.7}$$

OBSERVAȚII

— Dacă sursele sînt identice, rezultă:

$$E_e = nE \text{ și } r_e = nr.$$

— Suma din relația (1.6) este o sumă algebrică. Dacă una sau mai multe surse sînt legate invers decît celelalte surse (în opoziție), atunci t.e.m. ale acestor surse se calculează cu semnul minus în relația (1.6).

2. LEGAREA SURSELOR ÎN PARALEL

Se consideră acum cazul a m surse identice, legate în paralel (fig. 1.6, *a*) (dacă sursele nu sînt identice, se aplică metodele ce se vor da pentru rețele complexe). Fiecare sursă debitează curentul i, astfel încît m surse vor debita curentul total $I = \Sigma i = mi$, deci:

$$I = mi \quad \text{sau} \quad i = \frac{I}{m}.$$

Notîndu-se cu e tensiunea electromotoare a unei surse, cu r rezistența sa interioară și cu U tensiunea între bornele AB ale grupului, se poate scrie pentru fiecare sursă:

$$U = e - ri = e - r\frac{I}{m} = e - \frac{r}{m} I = e_e - r_e I.$$

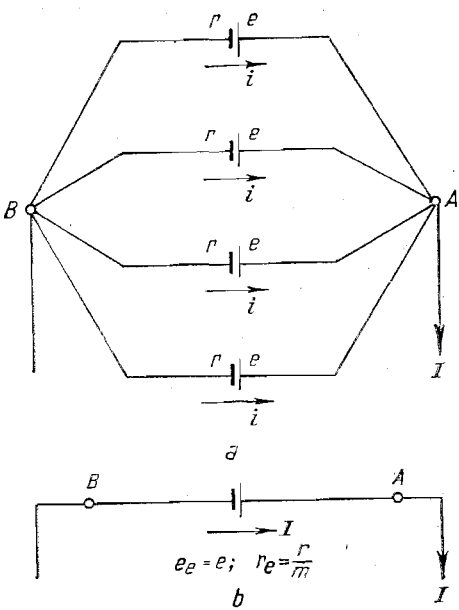


Fig. 1.6. Surse legate în paralel.

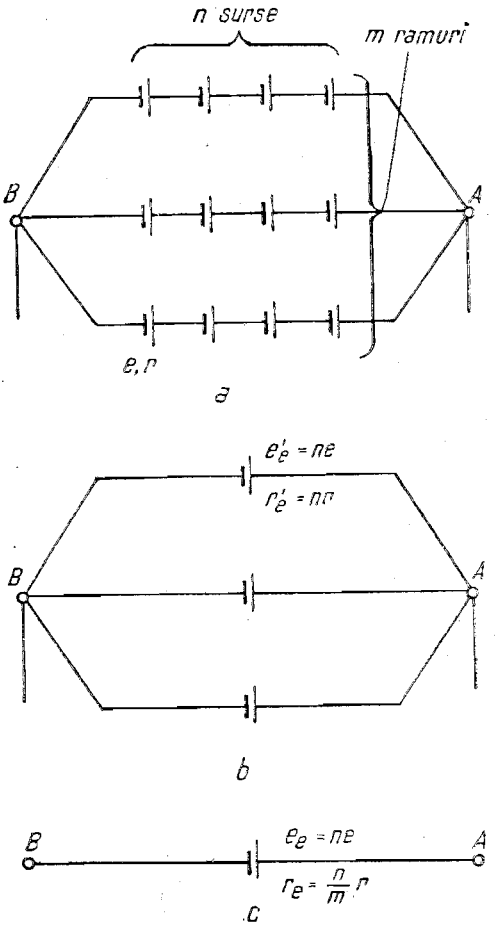


Fig. 1.7. Surse legate mixt.

Din ultima relație rezultă că sursele în paralel pot fi înlocuite cu o sursă echivalentă care are t.e.m.:

$$e_e = e \tag{1.8}$$

și rezistența interioară:

$$r_e = \frac{r}{m}, \tag{1.9}$$

adică legarea în paralel a surselor nu modifică t.e.m. echivalentă, dar micșorează rezistența interioară de m ori.

3. LEGAREA MIXTĂ A SURSELOR

În acest caz, grupul de surse conține m ramuri identice în paralel, fiecare ramură avînd n surse în serie (fig. 1.7, *a*).

Fiecare ramură conținînd n elemente identice în serie este echivalentă cu o sursă avînd tensiunea electromotoare $e'_e = ne$ și rezistența interioară $r'_e = nr$

(fig. 1.7, *b*). Ținîndu-se seamă de faptul că există m asemenea ramuri în paralel, rezultă că grupul este echivalent cu o sursă care are tensiunea electromotoare:

$$e_e = e'_e = ne$$

și rezistența interioară:

$$r_e = \frac{r'_e}{m} = \frac{n}{m} r \qquad \text{(fig. 1.7, } c\text{)},$$

deci:

$$e_e = ne; \quad r_e = \frac{n}{m} r \cdot \tag{1.10}$$

Legarea mixtă se folosește pentru a se obține simultan tensiuni și curenți mari.

E. REZOLVAREA REȚELELOR PRIN METODA TRANSFIGURĂRII

Rețelele constituite din rezistoare montate în serie, în paralel sau mixt, sau alimentate cu surse legate în serie, în paralel sau mixt, se pot reduce (transfigura) ușor, cu ajutorul relațiilor cunoscute mai înainte, la un circuit simplu, ca cel din figura 1.1.

De exemplu, în circuitul din figura 1.8, *a*, patru surse legate mixt, alimentează cinci rezistoare legate mixt. Într-o primă etapă, circuitul se poate reduce la cel din figura 1.8, *b*, în care sursele E_3 legate în paralel sînt înlocuite cu o sursă echivalentă avînd t.e.m.:

$$E_{e1} = E_3$$

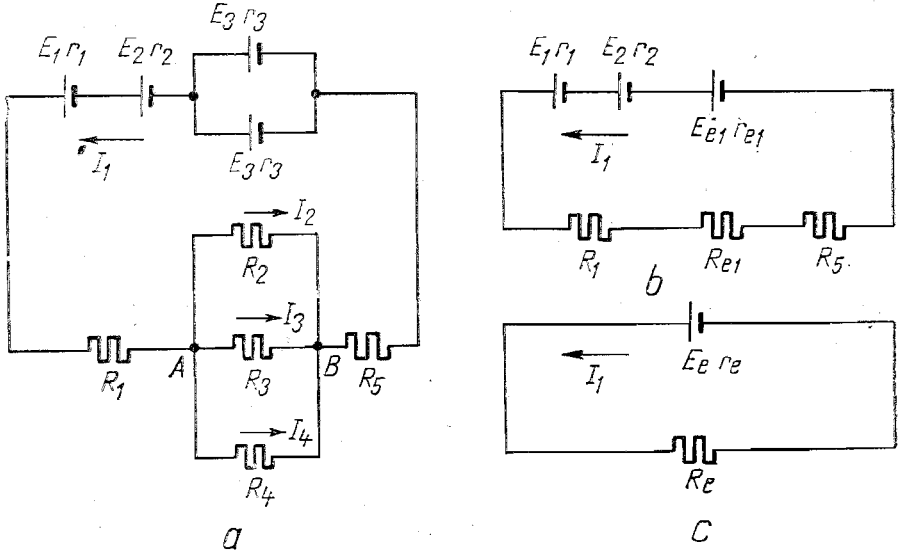


Fig. 1.8. Rezolvarea rețelelor prin metoda transfigurării.

și rezistența interioară:

$$r_{e1} = \frac{r_3}{2},$$

iar rezistențele R_2, R_3 și R_4 sînt înlocuite cu rezistența echivalentă R_{e1}, a cărei valoare este:

$$\frac{1}{R_{e1}} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}.$$

Circuitul se poate reduce apoi la forma simplă din figura 1.8, *c*, calculîndu-se sursa echivalentă, și anume:

$$E_e = E_1 + E_2 + E_{e1}; \quad r_e = r_1 + r_2 + r_{e1}$$

și rezistența echivalentă:

$$R_e = R_1 + R_{e1} + R_5.$$

Curentul I_1 se calculează conform relației (1.2):

$$I_1 = \frac{E_e}{R_e + r_e}.$$

Pentru calculul curenților I_2, I_3 și I_4 se determină căderea de tensiune între punctele AB, produsă de curentul total I_1 în rezistența echivalentă R_{e1}, cădere de tensiune care este egală cu cea produsă de fiecare din curenții I_2, I_3 și I_4 în rezistențele parcurse de fiecare dintre ei, adică:

$$U_{AB} = R_{e1}I_1 = R_2I_2 = R_3I_3 = R_4I_4$$

și se deduce:

$$I_2 = \frac{R_{e1}I_1}{R_0}; \quad I_3 = \frac{R_{e1}I_1}{R_3}; \quad I_4 = \frac{R_{e1}I_1}{R_4}.$$

Transfigurarea triunghi-stea. În rețelele electrice există, în numeroase cazuri, grupuri de cîte trei rezistențe, care pot fi legate:

— după laturile unui triunghi, vîrfurile triunghiului fiind trei noduri A,B,C ale rețelei (fig. 1.9, *a*);

— după o stea, vîrfurile stelei putînd fi sau nu trei noduri ale rețelei (fig. 1.9, *b*).

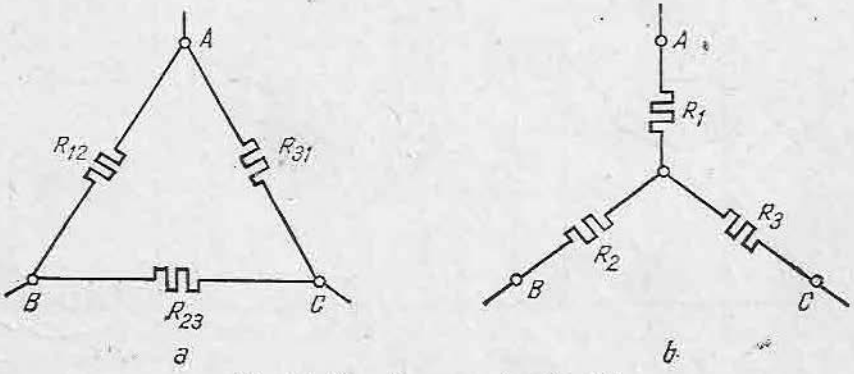


Fig. 1.9. Transfigurarea stea-triunghi.

În unele cazuri, rezolvarea rețelei este mai simplă cînd cele trei rezistențe sînt legate în stea, iar alte cazuri, dimpotrivă, cînd rezistențele sînt legate în triunghi. Pentru reducerea rețelei la o formă mai simplă se folosește, de la caz la caz, transfigurarea triunghiului într-o stea echivalentă, respectiv transfigurarea stelei într-un triunghi echivalent.

Se notează cu R_1, R_2, R_3 rezistențele laturilor stelei și cu R_{12}, R_{23}, R_{31} rezistențele laturilor triunghiului (rezistența R_1 este legată la nodul A, rezistența R_{23} între nodurile B și C etc.). Se poate arăta că, dacă se cunosc rezistențele R_{12}, R_{23}, R_{31} ale triunghiului, rezistențele R_1, R_2, R_3 ale stelei echivalente sînt date de relațiile:

$$R_1 = \frac{R_{12}R_{31}}{R_{12}+R_{23}+R_{31}}; \quad R_2 = \frac{R_{23}R_{12}}{R_{12}+R_{23}+R_{31}}; \quad R_3 = \frac{R_{31}R_{23}}{R_{12}+R_{23}+R_{31}}. \tag{1.11}$$

Invers, dacă se cunosc rezistențele R_1, R_2, R_3, atunci:

$$R_{12} = R_1 + R_2 + \frac{R_1R_2}{R_3}; \quad R_{23} = R_2 + R_3 + \frac{R_2R_3}{R_1};$$

$$R_{31} = R_3 + R_1 + \frac{R_3R_1}{R_2}. \tag{1.12}$$

OBSERVAȚIE

Relațiile (1.11) și (1.12) nu sînt suficiente pentru efectuarea transfigurării, dacă pe una sau pe mai multe din laturile triunghiului sau stelei considerate se găsesc și tensiuni electromotoare.

Exemplu de rezolvare a unei rețele prin transfigurarea din triunghi în stea. În rețeaua din figura 1.10, *a*,

$$E = 5{,}2\ \text{V},\ R_{12} = 2\Omega,\ R_{23} = 5\Omega,\ R_{31} = 3\Omega,$$
$$R_4 = 2\Omega,\ R_5 = 4{,}5\Omega.$$

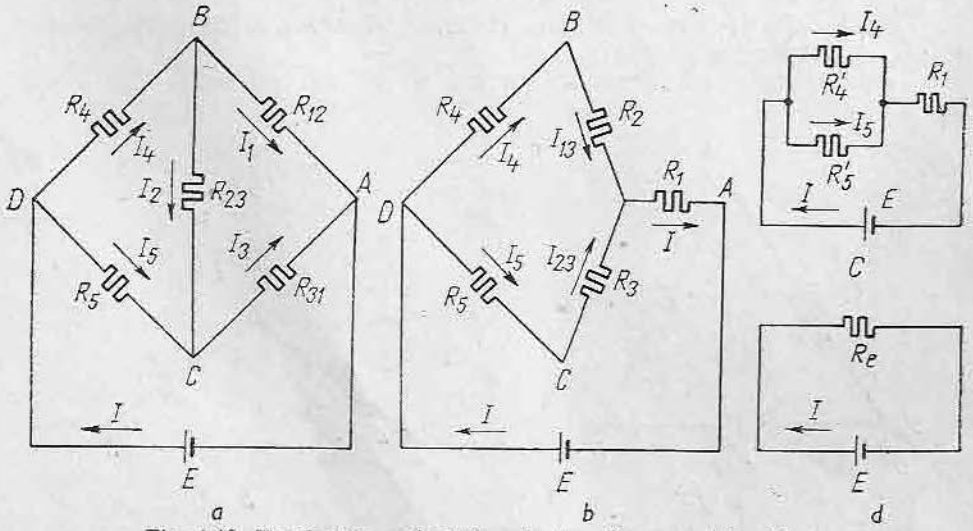


Fig. 1.10. Rezolvarea unei rețele prin transfigurarea triunghi-stea.

Se transformă triunghiul format de rezistențele R_{12}, R_{23}, R_{31}, într-o stea echivalentă (fig. 1.10, *b*):

$$R_1 = \frac{R_{12}R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} = \frac{2 \times 3}{2 + 5 + 3} = 0{,}6\Omega;$$

$$R_2 = \frac{R_{23}R_{12}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} = \frac{5 \times 2}{2 + 5 + 3} = 1\Omega;$$

$$R_3 = \frac{R_{31}R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} = \frac{3 \times 5}{2 + 5 + 3} = 1{,}5\Omega.$$

Se calculează rezistențele legate în serie:

$$R'_4 = R_4 + R_2 = 2 + 1 = 2\Omega;$$

$$R'_5 = R_5 + R_3 = 4{,}5 + 1{,}5 = 6\Omega,$$

și se reduce astfel rețeaua la schema din figura 1.10, *c*.
Rezistența echivalentă rezultă:

$$R_e = R_{45} + R_1 = \frac{R'_4R'_5}{R'_4 + R'_5} + R_1 = \frac{3 \times 6}{3 + 6} + 0{,}6 = 2 + 0{,}6 = 2{,}6\Omega$$

reducîndu-se astfel rețeaua la circuitul simplu din figura 1.10, *d*.

F. REZOLVAREA REȚELELOR PRIN METODA LEGILOR LUI KIRCHHOFF

Rețelele complexe se rezolvă, în general, prin aplicarea legilor lui Kirchhoff. Considerîndu-se o rețea oarecare, în această rețea există n noduri și l laturi. Toate laturile conțin o anumită rezistență, iar unele au și tensiuni electromotoare. Fiecare latură este parcursă de un curent, deci în total în rețea există l curenți.

În general, se cunosc tensiunile electromotoare și rezistențele și trebuie să se determine curenții. În consecință, într-o asemenea rețea există l curenți necunoscuți. Pentru determinarea lor se procedează în modul următor:

● Se notează cu $I_1, I_2, ..., I_l$ curenții în laturi. Deoarece nu se cunoaște sensul acestor curenți, inițial acest sens se alege arbitrar.

● Se scrie legea I a lui Kirchhoff pentru $n - 1$ noduri, deci se obțin $n - 1$ ecuații între curenți, aceste ecuații fiind de forma:

$$\Sigma I = 0 \quad (n - 1 \text{ ecuații}). \tag{1.13}$$

Se aleg în rețea $l - n + 1$ circuite închise independente, pentru care se scrie legea a II-a a lui Kirchhoff, deci se obțin $l - n + 1$ ecuații între curenți, tensiuni electromotoare și rezistențe de forma:

$$\Sigma E = \Sigma RI \quad (l - n + 1 \text{ ecuații}). \tag{1.14}$$

● În total, se obțin $(n - 1) + (l - n + 1) = l$ ecuații, adică un număr de ecuații egal cu numărul de curenți necunoscuți.

Prin rezolvarea sistemului de ecuații se deduc curenții. Curenții rezultați din calcul cu semn + (pozitiv) circulă în sensul ales inițial în mod arbitrar.

Curenții rezultați din calcul cu semn — (negativ) circulă în sens contrar.

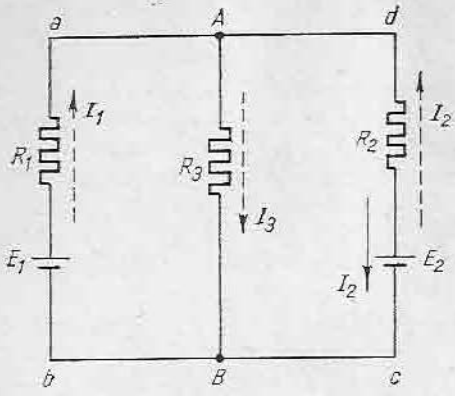


Fig. 1.11. Rezolvarea unei rețele prin metoda legilor lui Kirchhoff.

OBSERVAȚII

Dacă nu se respectă indicațiile de mai sus cu privire la scrierea legii I a lui Kirchhoff în numai $n - 1$ noduri (nu în toate cele n noduri) și cu privire la independența circuitelor, sistemul format nu este determinat și nu se poate rezolva, deoarece conține mai multe necunoscute decît ecuații independente. Un circuit oarecare este independent, dacă el nu se poate obține din combinarea unor circuite folosite anterior. Pentru a avea certitudinea că circuitele sînt independente, ele trebuie să aibă cel puțin o latură care nu a mai fost folosită.

Exemplu. Să se determine curenții în rețeaua din figura 1.11, cunoscîndu-se:

$$E_1 = 48\text{V};\ E_2 = 19\text{V};\ R_1 = 2\Omega;\ R_2 = 3\Omega;\ R_3 = 4\Omega.$$

Să se întocmească bilanțul energetic.

Soluție. Rețeaua are $n = 2$ noduri (A și B) și $l = 3$ laturi. În consecință, se vor scrie $n - 1 = 1$, ecuație din legea I și $l - n + 1 = 2$ ecuații din legea a II-a a lui Kirchhoff. Pentru curenții necunoscuți I_1, I_2, I_3 se alege arbitrar sensul indicat prin săgețile punctate.

Din legea I scrisă pentru nodul A, apoi din legea a II-a scrisă pentru circuitele $BbaAB$, $BAdcB$ (parcurse în sensul indicat de litere) se obține următorul sistem de trei ecuații independente cu trei necunoscute:

$$\begin{cases} I_1 + I_2 - I_3 = 0 \\ R_1 I_1 + R_3 I_3 = E_1 \\ -R_3 I_3 - R_2 I_2 = -E_2 \end{cases} \quad \text{sau:} \quad \begin{cases} I_1 + I_2 - I_3 = 0 & (a) \\ 2I_1 + 4I_3 = 48 & (b) \\ 4I_3 + 3I_2 = 19. & (c) \end{cases}$$

Sistemul de ecuații (a), (b), (c) se rezolvă printr-o metodă oarecare, de exemplu prin substituție:

$$\text{din } (b):\ I_1 = \frac{48 - 4I_3}{2} = 24 - 2I_3;$$

$$\text{din } (c):\ I_2 = \frac{19 - 4I_3}{3}.$$

Înlocuindu-se valorile I_1 și I_2 de mai sus în ecuația (a) se obține:

$$24 - 2I_3 + \frac{19 - 4I_3}{3} - I_3 = 0.$$

sau:

$$72 - 6I_3 + 19 - 4I_3 - 3I_3 = 0, \text{ de unde } 13I_3 = 91.$$

Rezultă:

$$I_3 = \frac{91}{13} = 7\text{A};\quad I_1 = 24 - 2 \times 7 = 10\text{A};\quad I_2 = \frac{19 - 4 \times 7}{3} = -3\text{ A}.$$

Curenții I_1 și I_3 rezultați pozitivi circulă în sensul ales inițial, dar curentul I_2 circulă în sens contrar sensului ales inițial (săgeata plină). Rezultă că E_2 reprezintă un receptor care absoarbe puterea $R_2 I_2$.

Pentru întocmirea bilanțului energetic, se ține seamă că singura sursă este E_1, debitînd puterea $P_d = E_1 I_1 = 48.10 = 480$ W. Consumatori de energie sînt R_1, R_2, R_3 și E_2, deci puterea total consumată este:

$$P_c = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 + R_3 I_3^2 + E_2 I_2 = 2 \cdot 10^2 + 3 \cdot 3^2 + 4 \cdot 7^2 + 19 \cdot 3 = 480\,\text{W}.$$

Se verifică relația $P_d = P_c$.

G. REZOLVAREA REȚELELOR PRIN METODA SUPERPOZIȚIEI

Metoda superpoziției sau a suprapunerii efectelor se aplică în rețelele în care există simultan mai multe tensiuni electromotoare $E_1, E_2, \ldots, E_n$. Fie I_k curentul produs de aceste tensiuni electromotoare în latura k. Pentru determinarea acestui curent se presupune că în rețea există numai tensiunea electromotoare E_1 și se determină valoarea curentului I_{k1} din latura k printr-o metodă oarecare. Se presupune apoi că în rețea există numai tensiunea electromotoare E_2 și se determină curentul I_{k2} în latura k și așa mai departe. Curentul I_k din latura k, în cazul cînd în rețea există simultan tensiunile electromotoare $E_1, E_2, \ldots, E_k$, are valoarea:

$$I_k = I_{k1} + I_{k2} + \ldots + I_{kn}. \tag{1.15}$$

Exemplu. Să se rezolve prin metoda superpoziției rețeaua din figura 1.11, cu aceleași date din exemplul precedent. În rețea existînd două surse, se vor face două serii de calcule. Mai întîi se consideră că în rețea există numai sursa E_1, ca în figura 1.12, *a*. Este de menționat că dacă sursele ce nu se iau în calcul au rezistențe interioare, acestea trebuie păstrate în schemă.

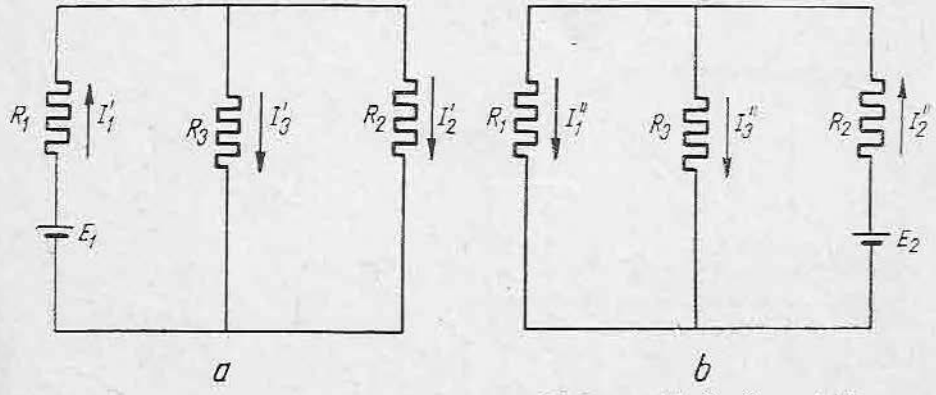


Fig. 1.12. Rezolvarea prin metoda superpoziției a rețelei din figura 1.11.

● Rezolvînd prin metoda transfigurării schema din figura 1.12, *a*, rezultă:

— rezistența echivalentă a rezistențelor R_2 și R_3 legate în paralel:

$$R_{23} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = \frac{3 \times 4}{3 + 4} = \frac{12}{7}\,\Omega;$$

— rezistența totală echivalentă:

$$R'_e = R_1 + R_{23} = 2 + \frac{12}{7} = \frac{26}{7}\,\Omega;$$

— rezultă curenții:

$$I'_1 = \frac{E_1}{R'_e} = \frac{48}{\frac{26}{7}} = \frac{336}{26} = \frac{168}{13}\,\text{A};$$

$$I'_2 = \frac{R_{23}}{R_2} I'_1 = \frac{\frac{12}{7}}{3} \times \frac{168}{13} = \frac{672}{91}\,\text{A};$$

$$I'_3 = \frac{R_{23}}{R_3} I'_1 = \frac{\frac{12}{7}}{4} \times \frac{168}{13} = \frac{504}{91}\,\text{A}.$$

● Se rezolvă apoi schema din figura 1.12, *b*:

— rezistența echivalentă a rezistențelor R_1 și R_3 este:

$$R_{13} = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3} = \frac{2 \times 4}{2 + 4} = \frac{8}{6} = \frac{4}{3}\,\Omega;$$

— rezistența totală echivalentă:

$$R''_e = R_{13} + R_2 = \frac{4}{3} + 3 = \frac{13}{3}\,\Omega;$$

— rezultă curenții:

$$I''_2 = \frac{E_2}{R''_e} = \frac{19}{\frac{13}{3}} = \frac{57}{13}\,\text{A};$$

$$I''_1 = \frac{R_{13}}{R_1} I''_2 = \frac{\frac{4}{3}}{2} \frac{57}{13} = \frac{114}{39} = \frac{38}{13}\,\text{A};$$

$$I''_3 = \frac{R_{13}}{R_3} {}''_2 I = \frac{\frac{4}{3}}{4} \frac{57}{13} = \frac{57}{39} = \frac{19}{13}\,\text{A}.$$

Curenții în laturile rețelei rezultă conform relației (1.15), ținîndu-se seamă de sensurile considerate în schemele din figura 1.12:

$$I_1 = I_1' - I_1'' = \frac{168}{13} - \frac{38}{13} = \frac{130}{13} = 10 \text{ A, cu sensul din figura 1.12,} a;$$

$$I_2 = I_2' - I_2'' = \frac{672}{91} - \frac{57}{13} = \frac{273}{91} = 3 \text{ A, cu sensul din figura 1.12, } a.$$

$$I_3 = I_3' + I_3'' = \frac{504}{91} + \frac{19}{13} = \frac{637}{91} = 7\text{A}.$$

H. REZOLVAREA REȚELELOR PRIN METODA CURENȚILOR CICLICI

Orice rețea se poate considera ca fiind formată din suprapunerea unor circuite separate, străbătute fiecare de un curent numit curent ciclic. Numărul de circuite în care se descompune o rețea este $l - n + 1$, egal cu cel pentru care se pot scrie ecuații distincte, după legea a II-a a lui Kirchhoff. De exemplu, rețeaua din figura 1.13,*a* se poate descompune în cele trei circuite din figura 1.13,*b*. Curenților ciclici $i_1, i_2, ..., i_n$, li se dă un sens arbitrar ca în figura 1.13,*b* și se scriu $l - n + 1$ ecuații de forma:

$$\begin{aligned} R_{11}i_1 + R_{12}i_2 + ... + R_{1n}i_n &= \sum E_1 \\ R_{21}i_1 + R_{22}i_2 + ... + R_{2n}i_n &= \sum E_2; \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ R_{n1}i_1 + R_{n2}i_2 + ... R_{nn}i_n &= \sum E_n; \end{aligned} \tag{1.16}$$

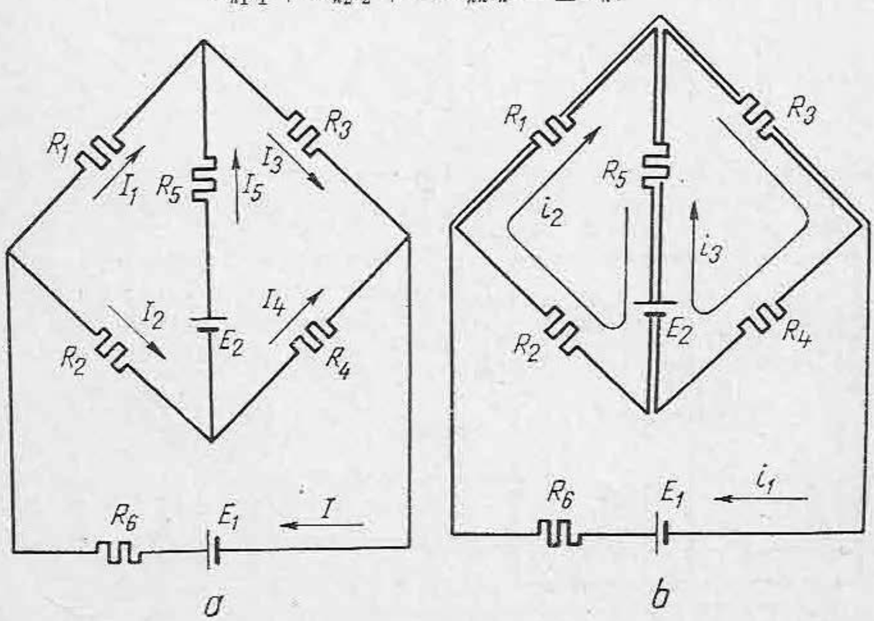


Fig. 1.13. Rezolvarea prin metoda curenților ciclici.

în care:

R_{11}, R_{22} etc. sînt rezistențele totale ale circuitelor separate 1, 2 ... n. În ecuații, aceste rezistențe sînt totdeauna pozitive;

$R_{nm} = R_{mn}$ este rezistența laturii comune circuitelor de ordinul n și m. Aceste rezistențe sînt pozitive dacă curenții ciclici de ordinul n și m au același sens în latura R_{nm}, și sînt negative dacă curenții ciclici au sensuri opuse în latura R_{nm};

$\sum E_n$ este suma algebrică a t.e.m. din circuitul de ordinul n. Acestea se consideră pozitive cînd sensul lor coincide cu sensul circuitului ciclic, și negative în cazul contrar.

De exemplu, în cazul rețelei din figura 1.13, sistemul de ecuații (1.16) este:

$$(R_1 + R_3 + R_6)\, i_1 + R_1 i_2 + R_3 i_3 = E_1;$$
$$R_1 i_1 + (R_1 + R_5 + R_2)\, i_2 - R_5 i_3 = -E_2;$$
$$R_3 i_1 - R_5 i_2 + (R_3 + R_4 + R_5)\, i_3 = E_2.$$

Prin rezolvarea sistemului de ecuații se află valorile curenților ciclici. Aceștia au sensurile luate inițial dacă valorile calculate sînt pozitive și au sens invers în caz contrar.

Curenții din laturile rețelei sînt egali cu suma algebrică a curenților ciclici care trec prin acea latură.

De exemplu, în cazul rețelei din figura 1.13:

$$I = i_1;$$
$$I_1 = i_1 + i_2;$$
$$I_2 = -i_2;$$
$$I_3 = i_1 + i_3;$$
$$I_4 = -i_3;$$
$$I_5 = -i_2 + i_3.$$

Exemplu. Să se rezolve prin metoda curenților ciclici rețeaua din figura 1.11, cu aceleași date ca la subcapitolul F. Rețeaua are $n = 2$ noduri și $l = 3$ laturi. Numărul de circuite separate este $l - n + 1 = 3 - 2 + 1 = 2$.

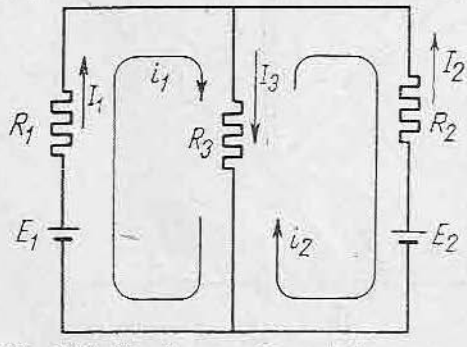


Fig. 1.14. Rezolvarea prin metoda curenților ciclici a rețelei din figura 1.11.

În figura 1.14 sînt luate arbitrar sensurile pentru curenții reali în laturi și sensurile pentru cei doi curenți ciclici.

Se scriu ecuațiile (1.16):

$$\begin{cases} (R_1 + R_3) i_1 - R_3 i_2 = E_1; \\ -R_3 i_1 + (R_3 + R_2)\, i_2 = -E_2; \end{cases}$$

$$\begin{cases} (2 + 4) i_1 - 4 i_2 = 48; \\ -4 i_1 + (4 + 3) i_2 = -19; \end{cases}$$

$$\begin{cases} 6 i_1 - 4 i_2 = 48; \\ -4 i_1 + 7 i_2 = -19. \end{cases}$$

Rezolvînd sistemul, se găsește:

$$i_1 = +\ 10\ \text{A};\ i_2 = +3\text{A}.$$

Curenții în laturile rețelei rezultă:

$$I_1 = i_1 = 10\ \text{A};$$

$$I_2 = -\ i_2 = -3\text{A};$$

deci $I_2 = +3\text{A}$, însă cu sensul invers decît cel din figura 1.14;

$$I_3 = i_1 - i_2 = 10 - 3 = 7\text{A}.$$

PROBLEME

1. În circuitul din figura 1.1, $E = 20$ V, $r = 0{,}2\ \Omega$, $R = 1{,}8\ \Omega$. Să se determine curentul I în circuit, tensiunea U la bornele sursei, puterea debitată P și randamentul sursei.

Răspuns: $I = 10$ A; $U = 18$ V; $P = 200$ W, $\eta = 0{,}9$.

2. La bornele unui generator de energie electrică cu tensiunea electromotoare de 120 V și rezistența interioară $r = 0{,}4\ \Omega$ este legat un cuptor electric cu rezistența $R = 3\Omega$. Cuptorul este alimentat prin două conductoare de cupru ($\rho = 0{,}018\ \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$) cu secțiunea $s = 6\ \text{mm}^2$ și lungimea $l = 100$ m fiecare. Se cere curentul în circuit, tensiunea la bornele generatorului și cuptorului, puterea absorbită de cuptor.

Răspuns: $I = 30$ A; $U_G = 108$ V; $U_c = 90$ V; $P_c = 2{,}7$ kW.

3. Trei rezistențe $R_1 = 2\Omega$, $R_2 = 4\ \Omega$, $R_3 = 12\ \Omega$ sînt legate în paralel și sînt parcurse de curentul total $I = 50$ A. Se cere rezistența echivalentă a grupului de trei rezistențe și curentul în fiecare din rezistențe.

Răspuns: $R_e = 1{,}2\ \Omega$; $I_1 = 30$ A; $I_2 = 15$ A; $I_3 = 5$ A.

4. Să se rezolve rețeaua din figura 1.15, cunoscîndu-se $E = 15$ V, $r = 0{,}45\ \Omega$, $R_1 = 0{,}8\ \Omega$, $R_2 = 3\ \Omega$, $R_3 = 6\ \Omega$, $R_4 = 5\ \Omega$, $R_5 = 20\ \Omega$, $R_6 = 12\ \Omega$.

Răspuns: $I = 2{,}4$ A; $I_2 = 1{,}6$ A; $I_3 = 0{,}8$ A; $I_4 = 1{,}44$ A; $I_5 = 0{,}36$ A; $I_6 = 0{,}6$ A.

5. O rezistență $R = 2{,}35\ \Omega$ este alimentată de la o baterie de acumulatoare, fiecare acumulator avînd tensiunea electromotoare $e = 2$ V și rezistența interioară $r = 0{,}2\ \Omega$. Bateria conține patru ramuri în paralel, iar fiecare ramură conține trei elemente în serie. Să se determine curentul în rezistența R, curentul printr-un acumulator, tensiunea la bornele bateriei, tensiunea la bornele unui acumulator.

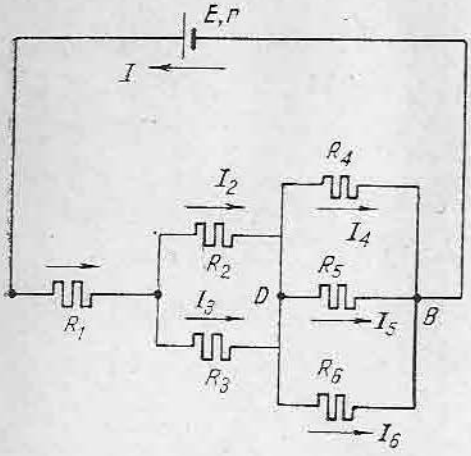
Răspuns: $I = 2{,}4$ A; $i_a = 0{,}6$ A; $U_b = 5{,}64$ V; $U_a = 1{,}88$ V.

6. Să se rezolve rețeaua din figura 1.16 cunoscînd: $E_1 = 28$ V; $E_2 = 115$ V; $R_1 = 6\ \Omega$; $R_2 = 10\ \Omega$; $R_3 = 2\Omega$; $R_4 = 5\ \Omega$; $R_5 = 3\ \Omega$.

Răspuns: $I_1 = 2{,}5$ A; $I_2 = 9$ A; $I_3 = 6{,}5$ A; $I_4 = 5$ A; $I_5 = 4$ A.

7. Să se rezolve rețeaua din figură 1.13, cunoscînd: $E_1 = 12$ V, $R_1 = 40\ \Omega$; $R_2 = 60\ \Omega$, $R_3 = 20\ \Omega$, $R_4 = 30\ \Omega$, $R_5 = 100\ \Omega$, $R_6 = 4\ \Omega$.

Răspuns: $I = 0{,}4$ A; $I_1 = 0{,}18$ A; $I_2 = 0{,}12$ A; $I_3 = 0{,}18$ A; $I_4 = 0{,}12$ A; $I_5 = 0$.



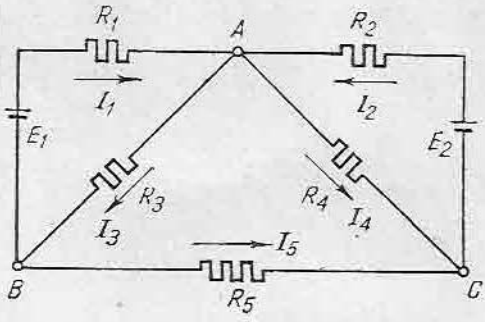


Fig. 1.15. Schema rețelei pentru problema 4. Fig. 1.16. Schema rețelei pentru problema 6.

REZUMAT

● **Legarea rezistențelor:**

în serie: $R_e = \sum_1^n R_i$

în paralel: $\frac{1}{R_e} = \sum_1^n \frac{1}{R_i}$; *caz particular:* (2 rezistoare în paralel) $R_e = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$

mixt.

● **Legarea surselor:**

în serie: $E_e = \sum_1^n E_i$; $r_e = \sum_1^n r_i$;

în paralel: $E_e = E$; $r_e = \frac{r}{m}$;

mixt: $E_e = nE$; $r_e = \frac{n}{m} r$.

● **Rezolvarea rețelelor**

circuit simplu — prin legea lui Ohm $\left(I = \frac{E}{R + r}\right)$;

rețele cu R sau E în serie, paralel sau mixt sau cu R în triunghi — prin metoda transfigurării:
rețele complexe — prin:
— metoda legilor lui Kirchhoff (metoda generală);
— metoda superpoziției — se utilizează mai rar, și numai cînd există cel puțin două surse, însă nici prea multe, deoarece necesită calcule numeroase (se rezolvă rețeaua de atîtea ori cîte surse conține);
— metoda curenților ciclici — se utilizează la rețele mai complicate, numărul de ecuații de rezolvat fiind mai redus ($l - n + 1$ ecuații, în loc de l ecuații ca la metoda lui Kirchhoff).

Capitolul 2

CALCULUL CIRCUITELOR DE CURENT ALTERNATIV

A. MĂRIMI PERIODICE, ALTERNATIVE ȘI ALTERNATIVE SINUSOIDALE

În aplicațiile industriale o largă utilizare o are curentul alternativ mai ușor de produs, de transportat și de distribuit.

● **Mărimea variabilă** a se exprimă algebric ca o funcție de timp:

$$a = f(t), \tag{2.1}$$

în care a este valoarea mărimii considerate la timpul t, numită *valoare instantanee.*

● **Mărimea periodică** este o mărime variabilă, la care valorile instantanee se repetă la intervale regulate de timp T:

$$a = f(t) = f(t + T) = \ldots = f(t + kT). \tag{2.2}$$

Intervalul minim de timp T după care mărimea trece prin aceleași valori se numește *perioadă* și se măsoară în secunde. Mărimea f, inversă perioadei se numește *frecvență*:

$$f = \frac{1}{T} \tag{2.3}$$

și reprezintă numărul de perioade într-o secundă; frecvența se măsoară în herți (simbol Hz; un herț = o perioadă pe secundă).

● **Mărimea alternativă** este o mărime periodică care trece prin valori pozitive și negative, după o anumită lege. Dacă mărimea a reprezintă un curent, aceasta înseamnă că sensul de circulație al curentului (al electronilor) se schimbă în mod periodic.

● **Mărime alternativă sinusoidală** sau, prescurtat, **mărime sinusoidală** este o mărime alternativă care variază în timp după o sinusoidă. În consecință, mărimea sinusoidală se poate scrie sub forma:

$$a = A_m \sin(\omega t + \psi), \tag{2.4}$$

sau sub forma:

$$a = A_m \cos(\omega t + \psi), \tag{2.5}$$

în care:

A este valoarea maximă a mărimii, numită amplitudine;
$\omega t + \psi$ — un unghi variabil (datorită variației timpului t), denumit *fază*;
ω — un factor constant, numit *pulsație*, având dimensiunile unei viteze unghiulare, deci se măsoară în $\frac{1}{s} = s^{-1}$;
ψ — un unghi constant, denumit *fază inițială.*

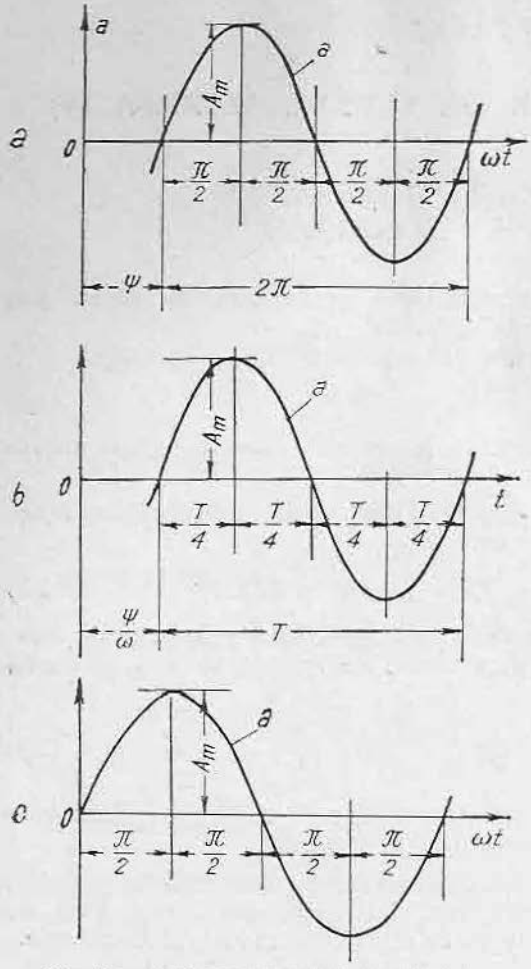


Fig. 2.1. Mărimea alternativă sinusoidală.

Reprezentarea mărimii (2.4) se poate face luîndu-se în abscisă fie unghiul ωt (fig. 2.1, *a*), fie timpul t (fig. 2.1, *b*).

În electrotehnică se obișnuiește să se lucreze cu funcția în sinus (2.4). De aceea, dacă este necesar, funcția în cosinus (2.5) se aduce la o funcție în sinus, ținîndu-se seamă de relația:

$$\cos x = \sin\left(x + \frac{\pi}{2}\right).$$

Notîndu-se cu T perioada, conform relației (2.2) trebuie ca:

$$A_m \sin(\omega t + \psi) = A_m \sin[\omega(t + T) + \psi] = A_m \sin(\omega t + \psi + \omega T).$$

După cum se știe din trigonometrie, relația de mai sus este satisfăcută pentru:

$$\omega T = 2\pi, \qquad (2.6)$$

deci în reprezentarea din figura 2.1, *a* perioada este 2π. Din relația (2.6) rezultă că perioada este:

$$T = \frac{2\pi}{\omega}, \qquad (2.7)$$

iar frecvența mărimii rezultă:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}. \qquad (2.8)$$

Din relația (2.8) se deduce relația care leagă pulsația ω și frecvența f:

$$\omega = 2\pi f. \qquad (2.9)$$

Prin schimbarea de variabilă $t = t' - \frac{\psi}{\omega}$, ecuația unei mărimi alternative poate fi adusă la o formă simplificată:

$$a = A_m \sin(\omega t + \psi) = A_m \sin\left[\omega\left(t' - \frac{\psi}{\omega}\right) + \psi\right] = A_m \sin \omega t',$$

adică la o formă care nu conține unghiul ψ. În acest caz, la timpul $t = 0$, mărimea a se anulează prin valori crescătoare (fig. 2.1, *c*). Aceasta înseamnă că unghiul ψ nu caracterizează proprietățile mărimii a (așa cum le caracte-

rizează pulsația ω și amplitudinea A_m). Acest unghi depinde numai de alegerea momentului inițial ($t = 0$), care este arbitrară.

Mărimea alternativă sinusoidală se anulează pentru $\sin(\omega t + \psi) = 0$, adică pentru $\omega t + \psi = k\pi$, este maximă ($+A_m$) pentru: $\sin(\omega t + \psi) = 1$, adică pentru $\omega t + \psi = 2k\pi + \frac{\pi}{2}$ și este minimă ($-A_m$) pentru $\sin(\omega t + \psi) = -1$, adică pentru $\omega t + \psi = 2k\pi + \frac{3\pi}{2}$.

În rețelele industriale, mărimile electrice și magnetice au variație alternativă; din acest motiv aceste rețele se numesc *rețele de curent alternativ*.

Frecvența rețelelor industriale de utilizare generală este standardizată în Europa la 50 Hz. Pentru utilizări speciale se folosesc și alte frecvențe.

B. FAZA ȘI DEFAZAJUL MĂRIMILOR ALTERNATIVE SINUSOIDALE

O mărime sinusoidală $a = A_m \sin(\omega t + \psi)$ poate avea faza inițială $\psi > 0$ sau $\psi < 0$.

Dacă unghiul ψ este negativ, mărimea a variază ca în figura 2.2, *a*, iar dacă el este pozitiv, mărimea a variază ca în figura 2.2, *b*.

Se numesc mărimi defazate două mărimi sinusoidale:

$$a_1 = A_{1m} \sin(\omega t + \psi_1) \quad \text{și} \quad a_2 = A_{2m} \sin(\omega t + \psi_2)$$

cu aceeași pulsație ω, dar cu faze inițiale $+\psi_1$ și $+\psi_2$ diferite (fig. 2.3).

Defazajul se măsoară prin diferența fazelor inițiale. Dacă fazele inițiale sînt exprimate prin unghiuri, unghiul de defazaj, în valoare absolută, notat ψ_d este dat de relația:

$$\psi_d = |\psi_1 - \psi_2|. \tag{2.10}$$

Privind figura 2.3 se spune că mărimea a_2 este defazată în urmă față de a_1, sau că mărimea a_1 este defazată înainte față de a_2.

Cînd cele două mărimi se anulează simultan, trec prin maxim și minim simultan (fig. 2.4); atunci $\psi_1 = \psi_2$, deci defazajul ψ_d este nul. Asemenea mărimi se numesc *mărimi în fază*.

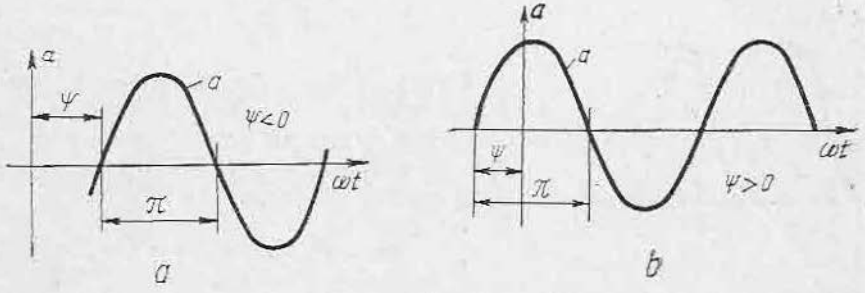


Fig. 2.2. Defazajul față de origine:
a — în urmă; *b* — înainte.

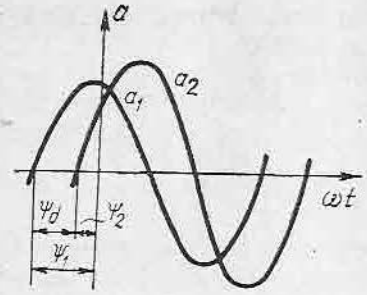


Fig. 2.3. Mărimi defazate.

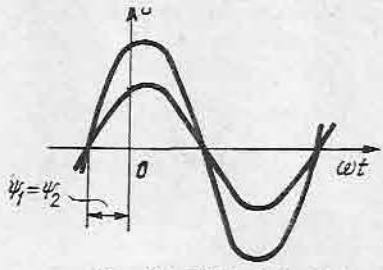


Fig. 2.4. Mărimi în fază.

C. EFECTUL TERMIC AL CURENȚILOR PERIODICI. VALOAREA EFICACE

Considerînd un curent periodic i care trece printr-o rezistență R, conform legii lui Joule-Lenz, rezistența consumă o putere $p = Ri^2$, variabilă odată cu curentul i, denumită *putere instantanee*.

Într-o perioadă T, rezistența R va consuma o energie W.

Ținîndu-se seama că puterea p este variabilă, energia W este în general dificil de calculat. Pentru efectuarea mai comodă a calculului, se presupune că rezistența R este parcursă de un curent continuu constant, de valoare I, astfel determinată, încît rezistența să absoarbă, în timpul T, aceeași energie W; valoarea I determinată ca mai sus (cu același efect termic) se numește *valoare eficace* sau *efectivă* a curentului periodic. Dacă se cunoaște legea de variație a curentului periodic i, se poate deduce valoarea sa eficace.

De exemplu, pentru un curent alternativ sinusoidal $i = I_m \sin \omega t$, (reprezentat punctat în figura 2.5), puterea instantanee $p = Ri^2 = RI_m^2 \sin^2 \omega t$ variază după curba trasată cu linie plină; ea este în permanență pozitivă, variind între zero (pentru $\sin \omega t = 0$) și RI_m^2 (pentru $\sin \omega t = \pm 1$).

Se poate arăta că valoarea eficace I a curentului se exprimă numai în funcție de valoarea maximă I_m, prin relația:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0{,}707\, I_m. \tag{2.11}$$

În mod analog, valoarea eficace U a tensiunii $u = U_m \sin \omega t$ este:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0{,}707\, U_m. \tag{2.12}$$

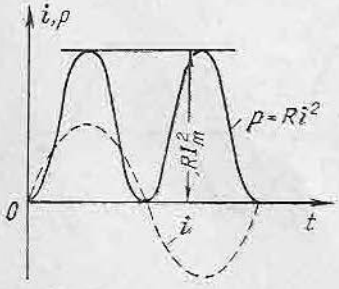


Fig. 2.5. Puterea instantanee absorbită de o rezistență prin care trece un curent sinusoidal.

Cunoscîndu-se valoarea eficace a curentului I sau tensiunii U, energia consumată de o rezistență R într-un timp T egal cu o perioadă (sau un multiplu al perioadei) se va calcula, ca și în curent continuu, cu relația:

$$W = RI^2T \quad \text{sau} \quad W = \frac{U^2}{R}\, T. \tag{2.13}$$

Majoritatea aparatelor de măsurat indică valoarea eficace a tensiunilor și curenților. Din

acest motiv, tensiunile și curenții alternativi sinusoidali se caracterizează nu prin amplitudine, ci prin valoarea lor eficace și prin urmare se scriu de obicei sub forma:

$$u = U\sqrt{2}\sin(\omega t + \psi) \tag{2.14}$$

$$i = I\sqrt{2}\sin(\omega t + \psi) \tag{2.15}$$

în care U și I sînt valori eficace. În consecință, cînd se vorbește de valoarea unei tensiuni sau a unui curent alternativ, dacă nu se face o mențiune specială, se subînțelege că este vorba de valoarea eficace.

D. REPREZENTAREA CINEMATICĂ (CU VECTORI ROTITORI) A MĂRIMILOR ALTERNATIVE SINUSOIDALE

Pe reprezentarea grafică în funcție de timp sau de unghi, numită și *reprezentare carteziană*, ca în figurile 2.1 ... 2.4, mărimile alternative și fenomenele legate de ele sînt greu de urmărit.

O mărime alternativă $a = A_m \sin(\omega t + \psi)$ se poate reprezenta printr-un vector rotitor OM (fig. 2.6), avînd modulul OM egal cu amplitudinea mărimii sinusoidale $OM = A_m$ și care se rotește în sens trigonometric cu viteza unghiulară ω.

La timpul oarecare t, vectorul OM face cu axa timpului Ox unghiul $\omega t + \psi$, numit *argument*.

Proiectînd vectorul $\overline{OM}$ pe axa Oy, perpendiculară pe Ox, se obține segmentul OA, egal cu valoarea instantanee a mărimii a:

$$OA = OM \sin \widehat{OMA} = A_m \sin(\omega t + \psi) = a.$$

În consecință, vectorul OM reprezintă convențional mărimea a, prin faptul că proiecția sa pe Oy este egală cu a.

Pentru simplificare, în reprezentarea cinematică, vectorii se reprezintă în poziția pe care o au la $t = 0$, adică defazați față de axa timpului cu faza inițială ψ.

În figura 2.7 și figura 2.8 sînt date exemple de reprezentare prin vectori a mărimilor alternative sinusoidale.

Prin reprezentarea cinematică, adunarea și scăderea mărimilor sinusoidale se poate face prin compunerea vectorilor ce reprezintă aceste mărimi.

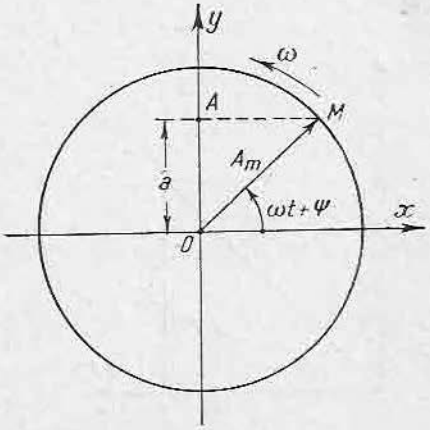


Fig. 2.6. Reprezentarea unei mărimi sinusoidale printr-un vector învîrtitor.

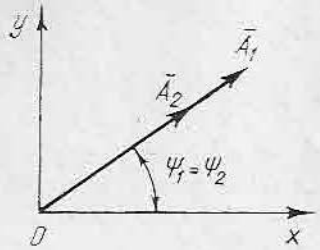


Fig. 2.7. Reprezentarea a două mărimi sinusoidale în fază (corespunzătoare fig. 2.4).

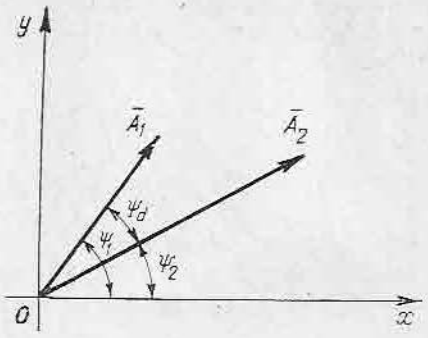


Fig. 2.8. Defazajul între doi vectori (corespunzător fig. 2.3).

E. REPREZENTAREA SIMBOLICĂ A MĂRIMILOR ALTERNATIVE

1. EXPRIMAREA VECTORILOR CU NUMERE COMPLEXE

În electrotehnică, numerele complexe se folosesc pentru a exprima vectorii prin relații analitice.

În acest scop se consideră un sistem de axe rectangulare Oxy(fig. 2.9). Un vector $\underline{V}_1$ de modul a, îndreptat după direcția axei Ox, se scrie analitic foarte simplu, exprimînd numai faptul că el are modulul a, deci:

$$\underline{V}_1 = a. \tag{2.16}$$

Dacă a este pozitiv, sensul vectorului coincide cu sensul pozitiv al lui Ox, iar dacă a este negativ, el coincide cu sensul negativ al lui Ox.

Un vector $\underline{V}_2$, de modul b, cu direcția după axa Oy, se scrie convențional sub forma:

$$\underline{V}_2 = \mathrm{j}b. \tag{2.17}$$

Dacă b este pozitiv, vectorul are sensul pozitiv al lui Oy, iar dacă b este negativ, el are sensul negativ a lui Oy.

Un vector oarecare $\underline{V}$ din plan va avea — după axele Ox, Oy — două componente $\underline{V}_1$ și $\underline{V}_2$, care se pot scrie algebric prin relații de forma (2.16) și (2.17). Ținîndu-se seama că $\underline{V}$ este suma lui $\underline{V}_1$ și $\underline{V}_2$, rezultă că vectorul $\underline{V}$ se poate scrie sub forma:

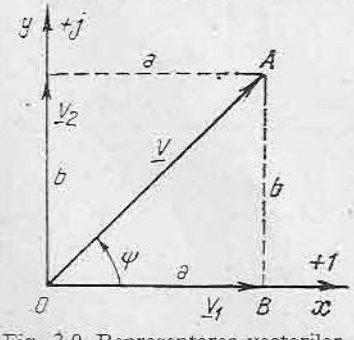


Fig. 2.9. Reprezentarea vectorilor prin numere complexe.

$$\underline{V} = \underline{V}_1 + \underline{V}_2 = a + \mathrm{j}b. \tag{2.18}$$

Axa Ox față de care vectorul are componenta $\underline{V}_1$, exprimată prin numărul real a, se numește *axă reală* și se notează cu $+1$. Axa Oy față de care vectorul are componenta $\underline{V}_2$, exprimată prin numărul imaginar $\mathrm{j}b$, se numește *axă imaginară* și se notează cu $+\mathrm{j}$.

Din figura 2.9 se vede ușor că modulul V al vectorului este

$$V = \sqrt{a^2 + b^2}, \tag{2.19}$$

iar argumentul său este dat de relația:

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{b}{a}. \tag{2.20}$$

De reținut. Vectorii exprimați prin numere complexe sînt denumiți și *fazori*, notîndu-se prin subliniere cu o liniuță, de exemplu: $\underline{U}$, $\underline{I}$. Diagrama în care sînt reprezentați fazorii se numește *diagramă fazorială*.

2. REPREZENTAREA TRIGONOMETRICĂ A VECTORILOR

Dacă se cunoaște vectorul $\underline{V}$ prin modulul V și argumentul ψ, pentru a obține expresia analitică a vectorului, se ține seamă de următoarele relații evidente deduse din triunghiul OBA:

$$a = V \cos \psi; \quad b = V \sin \psi.$$

În consecință:

$$\underline{V} = a + \mathrm{j}b = V \cos \psi + \mathrm{j}V \sin \psi = V(\cos \psi + \mathrm{j} \sin \psi). \tag{2.21}$$

Relația (2.21) se numește *reprezentare trigonometrică a vectorului.*

3. OPERAȚII CU FAZORI

● **Adunarea.** Dacă se dau doi fazori $\underline{V}_1 = a_1 + \mathrm{j}b_1$ și $\underline{V}_2 = a_2 + \mathrm{j}b_2$, suma lor este fazorul $\underline{V}$.

$$\underline{V} = \underline{V}_1 + \underline{V}_2 = (a_1 + \mathrm{j}b_1) + (a_2 + \mathrm{j}b_2) = (a_1 + a_2) + \mathrm{j}(b_1 + b_2) \tag{2.22}$$

(se însumează separat componentele reale și cele imaginare).

● **Scăderea.** Diferența fazorilor V_1 și V_2 este fazorul V.

$$\underline{V} = \underline{V}_1 - \underline{V}_2 = (a_1 + \mathrm{j}b_1) - (a_2 + \mathrm{j}b_2) = (a_1 - a_2) + \mathrm{j}(b_1 - b_2) \tag{2.23}$$

(se scad separat componentele reale și cele imaginare).

● **Produsul fazorilor.** $\underline{V}_1$ și $\underline{V}_2$ este fazorul $\underline{V}$:

$$\underline{V} = \underline{V}_1\underline{V}_2 = (a_1 + \mathrm{j}b_1)(a_2 + \mathrm{j}b_2) = (a_1a_2 - b_1b_2) + \mathrm{j}\,(a_1b_2 + a_2b_1). \tag{2.24}$$

În această relație s-a folosit relația cunoscută din calculul cu numere imaginare:

$$\mathrm{j}^2 = (\sqrt{-1})^2 = -1.$$

Ținîndu-se seama că argumentele fazorilor $\underline{V}_1$ și $\underline{V}_2$ sînt:

$$\operatorname{tg} \psi_1 = \frac{b_1}{a_1} \quad \text{și} \quad \operatorname{tg} \psi_2 = \frac{b_2}{a_2},$$

argumentul ψ al fazorului $\underline{V}$ rezultă din relația (2.24):

$$\operatorname{tg}\psi = \frac{a_1b_2 + a_2b_1}{a_1a_2 - b_1b_2} = \frac{\dfrac{b_1}{a_1} + \dfrac{b_2}{a_2}}{1 - \dfrac{b_1}{a_1}\cdot\dfrac{b_2}{a_2}} = \frac{\operatorname{tg}\psi_1 + \operatorname{tg}\psi_2}{1 - \operatorname{tg}\psi_1 \operatorname{tg}\psi_2} = \operatorname{tg}(\psi_1 + \psi_2). \quad (2.25)$$

Din relațiile (2.24) și (2.25) rezultă că modulul fazorului $\underline{V}$ este egal cu produsul modulelor V_1V_2 iar argumentul său este egal cu suma argumentelor $\psi_1 + \psi_2$.

Produsul a doi fazori conjugați. Se numesc *fazori conjugați* doi fazori care au același modul, iar argumentele egale și de semn contrar. De exemplu, $\underline{V}_1 = a + jb$ și $\underline{V}_2 = a - jb$. Produsul lor este fazorul V.

$$\underline{V} = \underline{V}_1\underline{V}_2 = (a + jb)(a - jb) = a^2 + b^2, \quad (2.26)$$

care nu mai are componentă imaginară și deci este așezat pe axa reală $+1$.

Produsul între un fazor $\underline{V}_1 = a + jb$ și unitatea imaginară j. Unitatea imaginară j se poate scrie ca un fazor $0 + j \times 1$, reprezentînd un fazor cu modulul 1 și argumentul $\frac{\pi}{2}$. Produsul dintre $\underline{V}_1$ și j, conform relației (2.24), este:

$$\underline{V} = j\underline{V}_1 = j(a + jb) = -b + ja \quad (2.27)$$

care are modulul conform relației (2.19):

$$V = \sqrt{b^2 + a^2}$$

egal cu modulul fazorului V_1 și argumentul (conform relației 2.25):

$$\psi = \psi_1 + \frac{\pi}{2}.$$

Deci, înmulțindu-se un fazor cu j, se obține un alt fazor, cu același modul dar defazat înainte cu $\frac{\pi}{2}$. Se mai poate spune că fazorul $j\underline{V}$ reprezintă fazorul $\underline{V}$ rotit înainte cu $\frac{\pi}{2}$. Este evident că dacă se înmulțește un fazor cu $-j$, el va fi rotit în urmă cu $\frac{\pi}{2}$.

● **Împărțirea a doi fazori.** Citul fazorilor $\underline{V}_1$ și $\underline{V}_2$ este un alt fazor $\underline{V}$:

$$\underline{V} = \frac{\underline{V}_1}{\underline{V}_2} = \frac{a_1 + jb_1}{a_2 + jb_2} = \frac{a_1a_2 + b_1b_2}{a_2^2 + b_2^2} + j\,\frac{b_1a_2 - a_1b_2}{a_2^2 + b_2^2} \quad (2.28)$$

cu argumentul $\psi = \psi_1 - \psi_2$.

F. REPREZENTAREA PRIN FAZORI A UNEI MĂRIMI b CARE REPREZITĂ VARIANȚIA ÎN TIMP A ALTEI MĂRIMI

$$a = A_m \sin \omega t, \quad \text{ADICĂ} \quad b = \frac{\Delta a}{\Delta t}.$$

În timpul Δt foarte mic, variația mărimii a este:

$$\Delta a = A_m \sin \omega(t + \Delta t) - A_m \sin \omega t = A_m \sin (\omega t + \omega \Delta t) - A_m \sin \omega t.$$

Ținînd seama de relația trigonometrică $\sin (a+b) = \sin a \cos b + \sin b \cos a$, rezultă că:

$$\Delta a = A_m [\sin \omega t \cos \omega \Delta t + \sin \omega \Delta t \cos \omega t] - A_m \sin \omega t.$$

Deoarece $\omega \Delta t$ este foarte mic, se poate considera $\sin \omega \Delta t = \omega \Delta t$, iar $\cos \omega \Delta t = \cos 0 = 1$. Expresia lui Δa devine:

$$\Delta a = A_m [\sin \omega t + \omega \Delta t \cos \omega t - \sin \omega t] = A_m \omega \Delta t \cos \omega t.$$

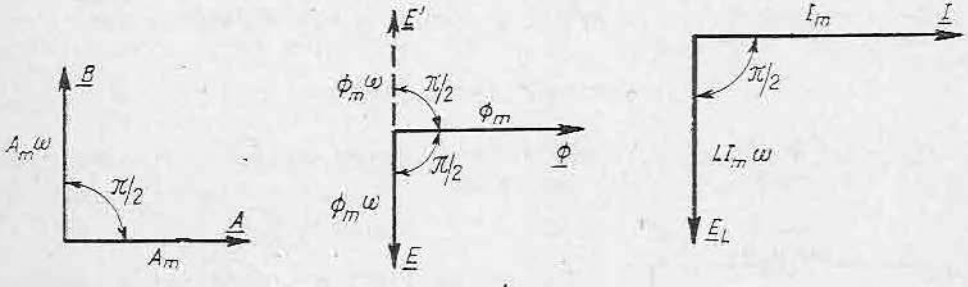
Variația în timp a mărimii a este deci:

$$b = \frac{\Delta a}{\Delta t} = A_m \omega \cos \omega t = B_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \tag{2.29}$$

adică tot o mărime sinusoidală, cu altă amplitudine $B_m = A_m \omega$ și defazată înainte cu $\pi/2$, reprezentată fazorial în figura 2.10, *a*.

Această concluzie este utilizată la aplicarea legii inducției. După cum se știe, dacă fluxul Φ cu valoarea maximă Φ_m al unei spire este variabil cu pulsația ω, în spiră se induce o tensiune electromotoare de inducție e, dată de relația:

$$e = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}.$$



a *b* *c*

Fig. 2.10. Reprezentarea prin fazori a unei mărimi care reprezintă variația în timp a altei mărimi:

a — mărimile a și $b = \frac{\Delta a}{\Delta t}$; b — t.e.m. e indusă de fluxul variabil φ; c — t.e.m. de autoinducție $e_L = -L \frac{\Delta i}{\Delta t}$.

Aplicînd rezultatul precedent, rezultă că dacă fluxul se reprezintă prin fazorul Φ (figura 2.10,*b*), mărimea $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ se reprezintă prin fazorul E', care are amplitudinea $\Phi_m\,\omega$ și este defazat cu $\frac{\pi}{2}$ înainte față de Φ.

Mărimea $e = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ este egală, însă în opoziție de fază cu mărimea $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$, deci se reprezintă prin fazorul E, care are amplitudinea $\Phi_m\omega$, dar este defazat cu $\frac{\pi}{2}$ în urmă față de Φ.

În mod analog se știe că dacă un curent alternativ i, cu amplitudine I_m, parcurge o inductanță L, curentul produce în inductanță o tensiune electromotoare de autoinducție dată de relația:

$$e_L = -L\frac{\Delta i}{\Delta t}.$$

Aplicînd rezultatul precedent, rezultă că dacă curentul i se reprezintă prin fazorul I cu amplitudine I_m, tensiunea electromotoare de autoinducție e_L se reprezintă printr-un fazor E_L defazat în urmă față de curentul I cu un unghi $\frac{\pi}{2}$. Amplitudinea sa fiind produsul dintre L și amplitudinea I_m a lui $\frac{\Delta i}{\Delta t}$, adică $LI_m\omega$ (fig. 2.10,*c*).

G. CALCULUL CIRCUITELOR DE CURENT ALTERNATIV MONOFAZAT

Toate metodele de calcul ale circuitelor alimentate cu curenți alternativi se bazează pe faptul că legile lui Kirchhoff, precum și alte relații deduse din aceste legi sînt valabile și în curent alternativ, însă pentru valorile instantanee ale curenților și tensiunilor electromotoare.

Pentru calculul circuitelor se consideră că toate rezistențele, inductivitățile și capacitățile nu variază cu tensiunea și curenții din circuite.

1. CIRCUIT CU REZISTENȚĂ R

Circuitul din figura 2.11 este format dintr-un rezistor cu rezistența R și este alimentat cu tensiunea sinusoidală

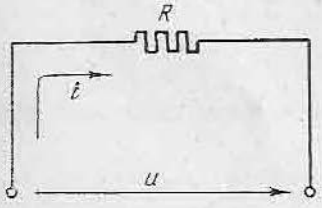


Fig. 2.11. Circuit cu rezistență R.

$$u = U\sqrt{2}\sin\omega t.$$

Aplicînd legea a II-a a lui Kirchhoff rezultă:

$$u = Ri \qquad (2.30)$$

de unde se deduce valoarea instantanee a curentului:

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U\sqrt{2}\sin\omega t}{R} = \frac{U}{R}\sqrt{2}\sin\omega t. \qquad (2.31)$$

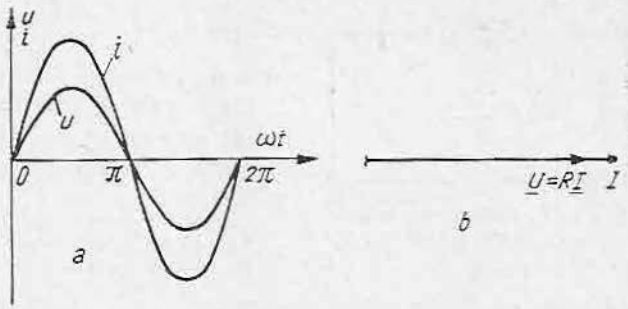


Fig. 2.12. Variația curentului i în circuitul cu rezistență și diagrama fazorială.

Din această relație se deduce:
— unghiul de defazaj φ este nul, și deci i este în fază cu u (fig. 2.12,*a*);
— valoarea eficace a curentului este:

$$I = \frac{U}{R} \tag{2.32}$$

relație identică cu cea utilizată în curent continuu, însă se referă la valori eficace.

Tensiunea și curentul se pot reprezenta prin fazorii U și I în fază pe axa reală (fig. 2.12, *b*).

Puterea instantanee p absorbită de rezistența R este:

$$p = Ri^2 = 2RI^2 \sin^2 \omega t \tag{2.33}$$

și variază după curba din figura 2.13. Ea este în permanență pozitivă și, prin urmare, circulă într-un singur sens, evident de la sursă spre rezistență.

Pentru simplificarea calculelor, nu se lucrează cu puteri instantanee, ci se consideră o putere medie constantă P, care într-o perioadă T ar produce aceeași energie W ca și puterea instantanee, adică:

$$P = \frac{W}{T}.$$

Conform relației (2.13), energia W se poate scrie: $W = RI^2T$, în care I este valoarea eficace a curentului. Înlocuind în relația anterioară, rezultă:

$$P = \frac{RI^2T}{T} = RI^2. \tag{2.34}$$

Relația este identică cu cea utilizată în curentul continuu, cu deosebirea că I este valoarea eficace a curentului.

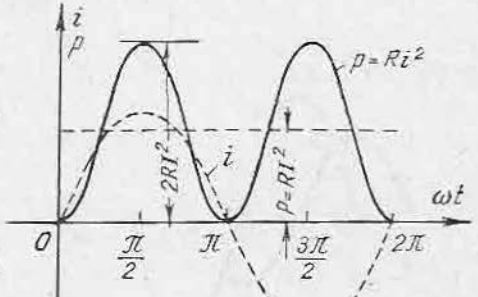


Fig. 2.13. Variația puterii instantanee $p = Ri^2$ absorbită de rezistența R; puterea activă $P = RI^2$.

2. CIRCUIT CU INDUCTANȚĂ *L*

În circuitul din figura 2.14, inductanța L este alimentată cu o tensiune sinusoidală u. Neavînd căderi de tensiune RI, ecuația a II-a a lui Kirchhoff se scrie:

$$u + e_L = 0 \text{ sau } u = -e_L \tag{2.35}$$

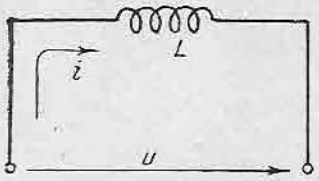


Fig. 2.14. Circuit cu inductanță L.

în care $e_L = -L\frac{\Delta i}{\Delta t}$ este tensiunea electromotoare de autoinducție în bobină.

După cum se știe din subcapitolul F, dacă un curent alternativ $i = I\sqrt{2}\sin\omega t$ parcurge o inductanță L, în aceasta se induce o t.e.m. de autoinducție:

$$e_L = -L\frac{\Delta i}{\Delta t} = -L\omega I\sqrt{2}\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right),$$

defazată cu $\frac{\pi}{2}$ în urma curentului.

Cum $u = -e_L$, rezultă că:

$$u = -e_L = L\omega I\sqrt{2}\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = U\sqrt{2}\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right). \qquad (2.36)$$

Din această relație se deduce:

— curentul i este defazat cu $\frac{\pi}{2}$ în urma tensiunii u (fig. 2.15);

— valoarea eficace a curentului este:

$$I = \frac{U}{L\omega} = \frac{U}{X_L}, \qquad (2.37)$$

în care $X_L = L\omega$ este reactanța inductivă corespunzătoare inductanței L.

În diagrama fazorială din figura 2.16, $\underline{I}$ este luat ca origină de fază, $\underline{E}_L$ este defazat cu $\frac{\pi}{2}$ în urma curentului, iar $\underline{U}$ este defazat cu $\frac{\pi}{2}$ înaintea curentului. Fazorul $\underline{U} = L\omega\underline{I}$ prin analogie cu termenii de formă RI se numește și *căderea de tensiune inductivă*.

Puterea instantanee p_L absorbită de inductanță este:

$$p_L = ui = U\sqrt{2}\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) I\sqrt{2}\sin\omega t =$$

$$= 2UI\sin\omega t\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = UI\cos\frac{\pi}{2} - UI\cos\left(2\omega t + \frac{\pi}{2}\right) =$$

$$= -UI\cos\left(2\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = UI\sin 2\omega t = X_L I^2\sin 2\omega t. \qquad (2.38)$$

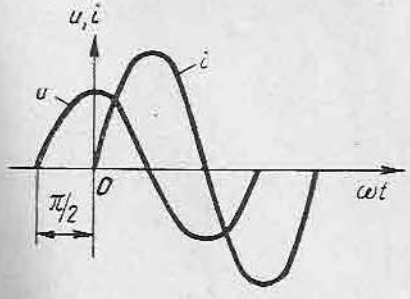


Fig. 2.15. Variația curentului i în circuitul cu inductanță.

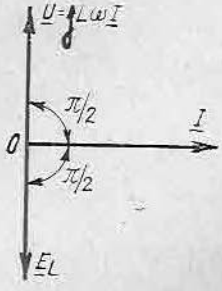


Fig. 2.16. Diagrama fazorială a circuitului cu inductanță.

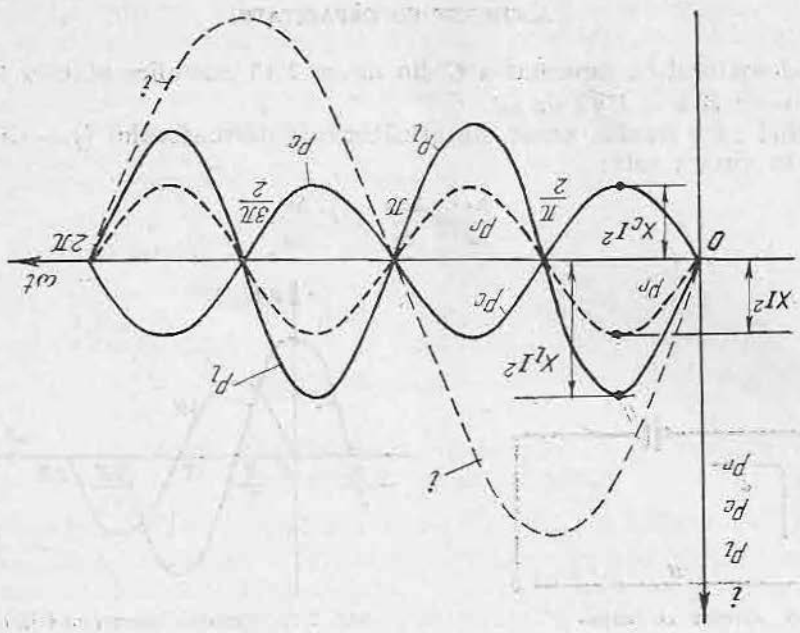


Fig. 2.17. Variația puterilor instantanee și puterea reactivă $Q = XI^2$.

Puterea p_L variază după curba sinusoidală din figura 2.17, cu o pulsație dublă decît a rețelei. În intervalele $0 - \frac{\pi}{2}$ și $\pi - \frac{3\pi}{2}$, cînd curentul crește în valoare absolută, deci cînd energia cîmpului magnetic crește, puterea p_L este pozitivă; în aceste intervale de timp, sursa cedează o energie pe care bobina o absoarbe efectiv, acumulînd-o în cîmpul său magnetic. În intervalele $\frac{\pi}{2} - \pi$ și $\frac{3\pi}{2} - 2\pi$, cînd curentul scade în valoare absolută, energia cîmpului magnetic scade, puterea p_L este negativă, cîmpul magnetic cedează o energie care este recuperată de sursă.

În concluzie, p_L este o putere cu sens de circulație alternativ, energia absorbită de bobină pe o perioadă W_L este nulă, iar puterea medie P_L este de asemenea nulă.

Cu toate că nu efectuează un transport de energie, circulația puterii P_L are consecințe tehnice și economice importante. Deoarece valoarea sa medie este nulă, această circulație de putere este caracterizată prin valoarea sa maximă Q_L:

$$Q_L = X_L I^2 \tag{2.39}$$

numită *putere reactivă*, în timp ce puterea P absorbită de rezistență se numește *putere activă*.

3. CIRCUIT CU CAPACITATE

Condensatorul cu capacitatea C din figura 2.18 este alimentat cu tensiunea sinusoidală $u = U\sqrt{2}\sin \omega t$.

Notînd cu q sarcina uneia din armăturile condensatorului ($q = Cu$), curentul în circuit este:

$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{\Delta Cu}{\Delta t} = C\frac{\Delta u}{\Delta t}.$$

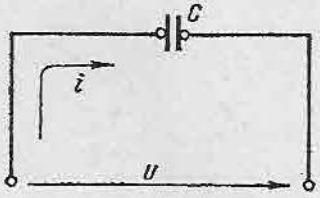


Fig. 2.18. Circuit cu capacitate.

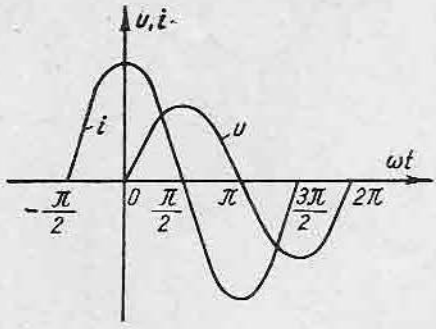


Fig. 2.19. Variația curentului i în circuitul cu capacitate.

Ținînd seamă de cele arătate în subcapitolul F, rezultă:

$$i = C\omega U\sqrt{2}\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right). \tag{2.40}$$

Din această relație se deduce:

— curentul i este defazat cu $\frac{\pi}{2}$ înaintea tensiunii u (fig. 2.19);

— valoarea eficace a curentului este

$$I = C\omega U = \frac{U}{X_c} \tag{2.41}$$

în care $X_c = \frac{1}{C\omega}$ se numește *reactanța capacitivă*.

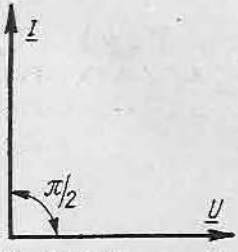


Fig. 2.20. Diagrama fazorială a circuitului cu capacitate.

Diagrama fazorială este reprezentată în figura 2.20, în care s-a luat ca origină de fază $\underline{U}$.

Prin analogie cu RI, termenul $\frac{I}{C\omega}$ se numește *cădere de tensiune capacitivă*.

Puterea instantanee p_c absorbită de capacitate, calculată similar ca în cazul inductanței rezultă:

$$p_c = X_c I^2 \sin^2 \omega t. \tag{2.42}$$

Variația acestei puteri este arătată în figura 2.17; este la fel ca a puterii p_L, cu deosebirea că în timpul

cît p_L este pozitiv, p_c este negativ și invers. Ca și în cazul inductanței, în sfertul de perioadă cînd p_c este pozitiv, capacitatea absoarbe energie, pe care o acumulează în cîmpul său electric, iar în sfertul următor de perioadă, cînd p_c este negativ, condensatorul se descarcă și cedează energia sursei de alimentare. Energia W_c consumată pe o perioadă este nulă și de asemenea puterea P_c este nulă.

Valoarea maximă a puterii instantanee:

$$Q_c = X_c I^2 \tag{2.43}$$

este *puterea reactivă*.

OBSERVAȚIE

Într-un circuit cu inductanță și capacitate, puterea reactivă este $Q = XI^2$ în care $X = \omega L - \frac{1}{\omega C}$ este reactanța totală a circuitului (v. fig. 2.17).

4. CIRCUIT CU REZISTENȚĂ, INDUCTANȚĂ ȘI CAPACITATE (R, L, C) LEGATE ÎN SERIE

Considerînd un circuit serie cu R, L, C (fig. 2.21), alimentat cu tensiunea sinusoidală u, curentul $i = I\sqrt{2}\sin\omega t$ care parcurge acest circuit va produce căderea de tensiune u_R în rezistență, căderea de tensiune u_L în inductanță și căderea de tensiune u_c în condensator, astfel încît:

$$u = u_R + u_L + u_C. \tag{2.44}$$

Această relație se transformă în relația fazorială:

$$\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_L + \underline{U}_C. \tag{2.45}$$

Pentru a determina fazorii $\underline{U}_R$, $\underline{U}_L$, $\underline{U}_C$ se reprezintă curentul i printr-un fazor de model I (fig. 2.22) și se ține seamă de cele arătate la paragrafele precedente. Căderea de tensiune $\underline{U}_R$ se reprezintă printr-un fazor $\underline{OA} = \underline{U}_R = R\underline{I}$ în fază cu curentul $\underline{I}$. Căderea de tensiune $\underline{U}_L$ se reprezintă printr-un fazor $\underline{OB'}$ cu modulul $L\omega I$ și defazat cu $\frac{\pi}{2}$ înaintea curentului $\underline{I}$, iar căderea

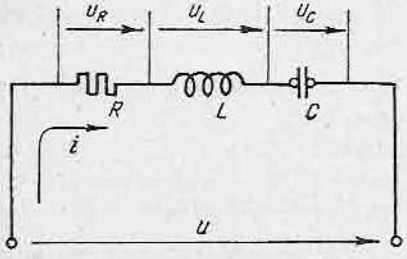


Fig. 2.21. Circuit serie cu *RLC*.

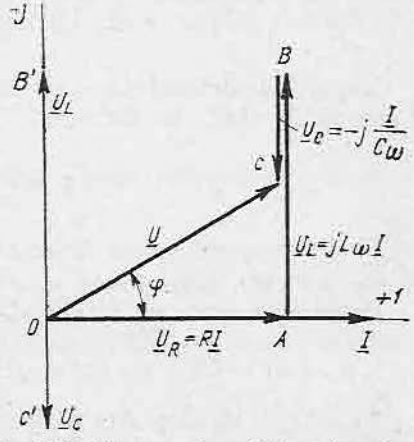


Fig. 2.22. Diagrama fazorială pentru circuitul serie cu *RLC*.

de tensiune $\underline{U_C}$ printr-un fazor $\underline{OC'}$ cu modulul $\frac{I}{C\omega}$, defazat cu $\frac{\pi}{2}$ în urma curentului.

Pentru construirea diagramei fazoriale, din vîrful fazorului $\underline{OA} = \underline{U_R}$ se construiește fazorul $\underline{AB} = \underline{U_L}$ defazat cu $\frac{\pi}{2}$ înainte față de $\underline{I}$, iar din B se construiește fazorul $\underline{BC} = \underline{U_c}$ defazat cu $\frac{\pi}{2}$ în urmă față de $\underline{I}$. Rezultanta $\underline{OC}$ a fazorilor $\underline{U_R}$, $\underline{U_L}$ și $\underline{U_c}$ este fazorul $\underline{U}$, conform relației (2.45).

Ținînd seamă că triunghiul OAC este triunghi dreptunghic, există relația

$$\overline{OC}^2 = \overline{OA}^2 + \overline{AC}^2,$$

în care:

$$\overline{OC} = U; \quad \overline{OA} = RI; \quad \overline{AC} = \overline{AB} - \overline{BC} = L\omega I - \frac{1}{C\omega} I =$$

$$= I\left(\omega L - \frac{1}{C\omega}\right) = IX,$$

în care $X = \omega L - \frac{1}{C\omega}$ este *reactanța totală a circuitului.*

Cu aceasta, relația precedentă devine:

$$U^2 = (RI)^2 + (XI)^2 = R^2I^2 + X^2I^2 = I^2(R^2 + X^2), \tag{2.46}$$

sau:

$$U = I\sqrt{R^2 + X^2} = IZ, \tag{2.47}$$

în care $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ este impedanța circuitului. Din relația (2.47) se deduce valoarea eficace a curentului I:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X^2}} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}}. \tag{2.48}$$

Unghiul de defazaj între tensiune și curent este $\varphi = \widehat{AOC}$. Din triunghiul dreptunghic OAC se deduce:

$$\cos\varphi = \frac{OA}{OC} = \frac{RI}{U} = \frac{RI}{ZI} = \frac{R}{Z}. \tag{2.49}$$

Deci tensiunea u este defazată înainte față de curentul i cu unghiul φ și are valoarea instantanee $u = U\sqrt{2}\sin(\omega t + \varphi)$.

Puterea instantanee totală absorbită de circuit este:

$$p_t = ui = U\sqrt{2}\sin(\omega t + \varphi) I\sqrt{2}\sin\omega t = 2UI\sin\omega t\sin(\omega t + \varphi).$$

Variația ei în timp este indicată în figura 2.23; se anulează cînd se anulează u sau i, trece prin valori pozitive, iar pentru timpi în general scurți, trece și prin valori negative.

Ținîndu-se seama de relația trigonometrică

$$\cos a - \cos b = 2 \sin \frac{a+b}{2} \sin \frac{b-a}{2}$$

relația anterioară se poate scrie:

$$p_t = UI \cos \varphi - UI \cos (2\omega t + \varphi).$$

Dezvoltînd în continuare cas $(2\omega t + \varphi)$ după relația trigonometrică $\cos (a + b) = \cos a \cos b - \sin a \sin b$ se obține:

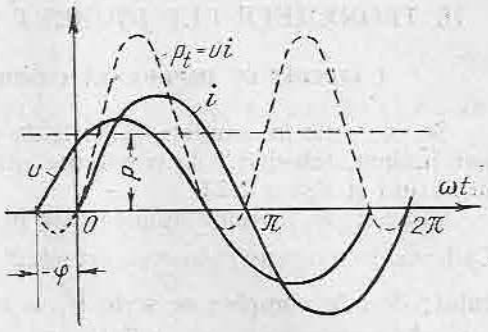


Fig. 2.23. Variația puterii instantanee totale $p_t = ui$; puterea activă $P = UI \cos \varphi$

$$p_t = UI \cos \varphi - UI[\cos 2\omega t \cos \varphi - \sin 2\omega t \sin \varphi]$$

sau

$$p_t = UI \cos \varphi (1 - \cos 2\omega t) + UI \sin \varphi \sin 2\omega t. \tag{2.50}$$

După cum se vede, puterea instantanee p_t se descompune în două părți:

● Prima parte $UI \cos \varphi (1 - \cos 2\omega t)$ are valoarea medie pe o perioadă $UI \cos \varphi$, deoarece $UI \cos \varphi \cos 2\omega t$ este o mărime sinusoidală cu valoarea medie nulă pe o perioadă.

S-a arătat că puterea activă P este valoarea medie a puterii instantanee și deci primul termen al relației reprezintă puterea activă:

$$P = UI \cos \varphi. \tag{2.51}$$

Factorul $\cos \varphi$ din expresia precedentă se numește *factor de putere*. El este todeauna pozitiv și subunitar.

● A doua parte, $UI \sin \varphi \sin 2\omega t$, este o mărime sinusoidală cu valoare medie nulă pe o perioadă și cu amplitudinea $UI \sin \varphi$, notată anterior Q și denumită *putere reactivă*. Deci:

$$Q = UI \sin \varphi. \tag{2.52}$$

Produsul UI din expresia puterilor activă și reactivă se numește *putere aparentă* și se notează de obicei cu S:

$$S = UI. \tag{2.53}$$

Puterea aparentă S se măsoară în voltamperi (VA), cu multiplii uzuali: kilovoltamperul (kVA) și megavoltamperul (MVA).

Puterea activă P se măsoară în wați (W) cu multiplii kilowatul (kV) și megawatul (MW). Puterea aparentă Q se măsoară în voltamperi reactivi (var) cu multiplii kilovarul (kvar) și megavarul (Mvar).

H. TEOREMELE LUI JOUBERT ȘI KIRCHHOFF, ÎN COMPLEX

1. CIRCUIT CU IMPEDANȚĂ COMPLEXĂ. TEOREMA LUI JOUBERT

Se vor scrie în complex căderile de tensiune din circuitul R, L, C examinat înainte, folosind cele cunoscute privind înmulțirea unui vector cu j și urmărind și figura 2.22.

Căderea de tensiune ohmică este în fază cu curentul $\underline{I}$ și deci $\underline{U}_R = R\underline{I}$. Căderea de tensiune inductivă este $L\omega\underline{I}$ și este defazată cu $\frac{\pi}{2}$ înaintea curentului; deci în complex se scrie $\underline{U}_L = \mathrm{j}L\omega\underline{I}$. Căderea de tensiune capacitivă este $\frac{1}{C\omega}$ și este defazată cu $\frac{\pi}{2}$ în urma curentului; deci în complex se scrie $\underline{U}_C = -\mathrm{j}\frac{\underline{I}}{C\omega}$. Relația (2.45) se scrie deci în complex astfel:

$$\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_L + \underline{U}_C = RI + \mathrm{j}L\omega I - \mathrm{j}\frac{1}{C\omega}\underline{I} \tag{2.54}$$

sau:

$$\underline{U} = \underline{I}\left[R + \mathrm{j}\left(\omega L - \frac{1}{C\omega}\right)\right] = \underline{I}(R + \mathrm{j}X), \tag{2.55}$$

în care X este reactanța totală a circuitului.

Termenul $R + \mathrm{j}X$ este *impedanța complexă*:

$$Z = R + \mathrm{j}X \tag{2.56}$$

care are modulul cunoscut $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ și argumentul φ dat de $\mathrm{tg}\,\varphi = \frac{X}{R}$. Este de remarcat că impedanța complexă $\underline{Z}$ nu depinde de mărimile $\underline{U}$ și $\underline{I}$ și nu este un vector învîrtitor, cum sînt $\underline{U}$ și $\underline{I}$. Relația (2.55) se poate scrie deci:

$$\underline{U} = \underline{Z}\underline{I}. \tag{2.57}$$

Aceasta este teorema lui Joubert, analoagă legii lui Ohm, numită și *legea generalizată a lui Ohm în complex*.

2. LEGILE LUI KIRCHHOFF ÎN COMPLEX

Pentru rețelele de curent alternativ se pot scrie două relații în complex, analoage legilor lui Kirchhoff, și anume:

Pentru un nod al rețelei de curent alternativ:

$$\Sigma\underline{I} = 0, \tag{2.58}$$

adică suma curenților în complex ce intră și ies dintr-un nod al unei rețele de curent alternativ este nulă.

Pentru un circuit al rețelei de curent alternativ:

$$\Sigma \underline{E} = \Sigma \underline{Z}\,\underline{I} \tag{2.59}$$

adică suma tensiunilor electromotoare în complex este egală cu suma căderilor de tensiune în complex.

I. REZOLVAREA REȚELELOR DE CURENT ALTERNATIV PRIN METODA LEGILOR LUI KIRCHHOFF

În cazul unei rețele complexe, cu mai multe laturi, noduri și tensiuni electromotoare, se procedează în mod analog ca în curent continuu. De obicei, într-o asemenea rețea se cunosc impedanțele laturilor și tensiunile electromotoare și se cer curenții; în cazul cînd există mai multe tensiuni electromotoare trebuie să se cunoască valoarea lor eficace, defazajul între ele și sensul lor considerat pozitiv.

Pentru calculul curenților se procedează astfel:

● Se notează cu $I_1, I_2, \ldots, I_n$ curenții necunoscuți din laturi și se alege arbitrar sensul lor considerat pozitiv.

● Dacă rețeaua are n noduri și l laturi se aleg $n-1$ noduri, în care, se scrie legea I, a lui Kirchhoff; se aleg, de asemenea, $l-n+1$ circuite închise (independente), în care se scrie legea a II-a a lui Kirchhoff.

● Pentru noduri, se scrie că suma curenților care intră în nod este nulă; curenții care intră efectiv în nod au semn +(pozitiv), iar curenții care ies din nod au semn −(negativ), adică:

$$\Sigma \underline{I} = 0 \quad (n-1 \text{ ecuații}). \tag{2.60}$$

Astfel, pentru nodul A din figura 2.24 legea I se scrie:

$$I_1 + I_2 - I_4 = 0.$$

● În fiecare circuit închis se alege un sens de parcurs și se scrie că suma tensiunilor electromotoare $\Sigma \underline{E}$ este egală cu suma căderilor de tensiune $\Sigma \underline{I}\,\underline{Z}$, adică:

$$\Sigma \underline{E} = \Sigma \underline{I}\,\underline{Z} (l - n + 1 \text{ ecuații}). \tag{2.61}$$

În relația (2.61), tensiunile electromotoare parcurse în sensul lor pozitiv au semnul +, iar cele parcurse în sens invers sensului lor pozitiv au semnul −; căderile de tensiune produse de curenți cu același sens cu sensul de par-

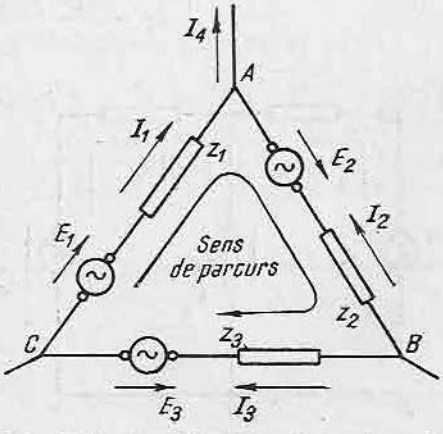


Fig. 2.24. Circuit închis pentru scrierea legilor lui Kirchhoff în cantități complexe.

curs au semnul + iar cele produse de curenți de sens contrar sensului de parcurs au semnul —. Astfel, pentru circuitul închis $ABCA$ din figura 2.24, legea a II-a se scrie:

$$\underline{E}_1 + \underline{E}_2 - \underline{E}_3 = \underline{I}_1\underline{Z}_1 - \underline{I}_2\underline{Z}_2 + \underline{I}_3\underline{Z}_3.$$

● Curenții se determină prin rezolvarea sistemului format de ecuațiile (2.60) și (2.61).

După efectuarea calculelor, dacă unii curenți rezultă negativi nu mai este necesară corectarea sensului, ca în cazul rețelelor de curent continuu, deoarece curentul alternativ își schimbă sensul de două ori în cursul unei perioade.

APLICAȚIE

Două generatoare cu tensiunile electromotoare $E_1 = 40$ V și $E_2 = 50$ V alimentează rețeaua din figura 2.25, în care $\underline{Z}_1 = 1{,}2 - j\,1{,}6\ \Omega$; $\underline{Z}_2 = 1 + j2\ \Omega$; $\underline{Z}_3 = 2 + j2\ \Omega$. Să se determine curenții, știindu-se că pentru sensurile pozitive ale tensiunilor electromotoare indicate prin săgeți, tensiunea electromotoare $\underline{E}_2$ este defazată cu $\frac{\pi}{2}$ înainte față de $\underline{E}_1$.

Soluție. Se alege $\underline{E}_1$ ca origine de fază, deci $E_1 = 40$ V. Deoarece $\underline{E}_2$ este defazat cu $\pi/2$ înainte față de $\underline{E}_1$, $\underline{E}_2$ are argumentul $\pi/2$, deci $E_2 = 50\left[\cos\frac{\pi}{2} + j\sin\frac{\pi}{2}\right] = j50$ V. Pentru curenți se aleg sensurile pozitive indicate prin săgeți. Din legea I a lui Kirchhoff în nodul A se deduce:

$$\underline{I}_1 + \underline{I}_2 - \underline{I}_3 = 0. \qquad (a)$$

Din legea a II-a aplicată circuitelor închise $DCABD$ și $GFABG$ se deduce:

$$\underline{E}_1 = \underline{I}_1\underline{Z}_1 + \underline{I}_3\underline{Z}_3; \qquad (b)$$

$$\underline{E}_2 = \underline{I}_2\underline{Z}_2 + \underline{I}_3\underline{Z}_3. \qquad (c)$$

Curenții se află rezolvînd sistemul format de ecuațiile (a), (b) și (c). Astfel, din ecuațiile (b) și (c) se deduce:

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{E}_1 - \underline{I}_3\underline{Z}_3}{\underline{Z}_1}; \quad \underline{I}_2 = \frac{\underline{E}_2 - \underline{I}_3\underline{Z}_3}{\underline{Z}_2}. \qquad (d)$$

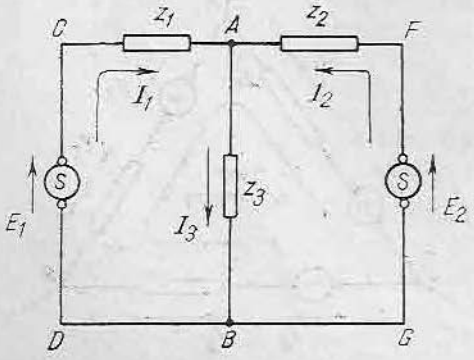


Fig. 2.25. Exemplu de rețea de curent alternativ.

Înlocuindu-se aceste valori în (a) se obține:

$$\frac{\underline{E}_1 - \underline{I}_3\underline{Z}_3}{\underline{Z}_1} + \frac{\underline{E}_2 - \underline{I}_3\underline{Z}_3}{\underline{Z}_2} - \underline{I}_3 = 0$$

de unde:

$$\underline{I}_3\left[\frac{\underline{Z}_3}{\underline{Z}_1} + \frac{\underline{Z}_3}{\underline{Z}_2} + 1\right] = \frac{\underline{E}_1}{\underline{Z}_1} + \frac{\underline{E}_2}{\underline{Z}_2},$$

$$\underline{I}_3 = \frac{\underline{E}_1\underline{Z}_2 + \underline{E}_2\underline{Z}_1}{\underline{Z}_1\underline{Z}_2 + \underline{Z}_2\underline{Z}_3 + \underline{Z}_3\underline{Z}_1} =$$

$$= \frac{\underline{E}_1\underline{Z}_2 + \underline{E}_2\underline{Z}_1}{\underline{Z}_1(\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3) + \underline{Z}_2\underline{Z}_3}.$$

Ținîndu-se seama că $\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3 = 1 + j2 + 2 + j2 = 3 + j4$, se deduce:

$$\underline{I}_3 = \frac{\underline{E}_1\underline{Z}_2 + \underline{E}_2\underline{Z}_1}{\underline{Z}_1(\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3) + \underline{Z}_2\underline{Z}_3} = \frac{40(1 + j2) + j50(1,2 - j1,6)}{(1,2 - j1,6)(3 + j4) + (1 + j2)(2 + j2)} =$$

$$= \frac{40 + 50 \cdot 1,6 + j(40 \cdot 2 + 50 \cdot 1,2)}{1,2 \cdot 3 + 1,6 \cdot 4 + j(1,2 \cdot 4 - 1,6 \cdot 3) + 2 - 4 + j(2 + 4)} =$$

$$= \frac{120 + j140}{8 + j6} = \frac{(120 + j140)(8 - j6)}{8^2 + 6^2} = \frac{1\,800 + j400}{100} = 18 + j4A.$$

Din ecuația (d) se deduce curentul $\underline{I}_1$:

$$\underline{I}_1 = \frac{40 - (18 + j4)(2 + j2)}{1,2 - j1,6} = \frac{40 - [18 \cdot 2 - 4 \cdot 2 + j(18 \cdot 2 + 4 \cdot 2)]}{1,2 - j1,6} =$$

$$= \frac{12 - j44}{1,2 - j1,6} = \frac{(12 - j44)(1,2 + j1,6)}{1,2^2 + 1,6^2} = \frac{84,8 - j33,6}{4} = 21,2 - j8,4 \text{ A}.$$

Curentul $\underline{I}_2$ se deduce din (d) sau din (a):

$$\underline{I}_2 = \underline{I}_3 - \underline{I}_1 = 18 + j4 - (21,2 - j8,4) = -3,2 + j12,4 \text{ A}.$$

Cunoscîndu-se valorile complexe ale curenților, se pot deduce valorile lor eficace:

$$I_1 = \sqrt{21,2^2 + 8,4^2} = 22,8 \text{ A};$$

$$I_2 = \sqrt{3,2^2 + 12,4^2} = 12,8 \text{ A};$$

$$I_3 = \sqrt{18^2 + 4^2} = 18,44 \text{ A}.$$

J. REZOLVAREA REȚELELOR DE CURENT ALTERNATIV PRIN METODA TRANSFIGURĂRII

1. IMPEDANȚA ECHIVALENTĂ A UNOR IMPEDANȚE LEGATE ÎN SERIE

Se consideră un circuit cu impedanțele $\underline{Z}_1 = R_1 + jX_1$; $\underline{Z}_2 = R_2 + jX_2$ ... ...; $\underline{Z}_n = R_n + jX_n$, legate în serie și alimentate de tensiunea $\underline{U}$ (fig. 2.26). Pentru curentul $\underline{I}$ din circuit se alege același sens pozitiv ca și pentru tensiunea $\underline{U}$. Ținînd seama de relația (2.59), legea a II-a a lui Kirchhoff se scrie:

$$\underline{U} = \underline{I}\underline{Z}_1 + \underline{I}\underline{Z}_2 + \underline{I}\underline{Z}_3 + \ldots + \underline{I}\underline{Z}_n =$$

$$= \underline{I}(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \ldots + \underline{Z}_n),$$

$$\underline{U} = \underline{I}\underline{Z}.$$

În această relație, impedanța $\underline{Z}$:

$$\underline{Z} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \ldots + \underline{Z}_n \qquad (2.62)$$

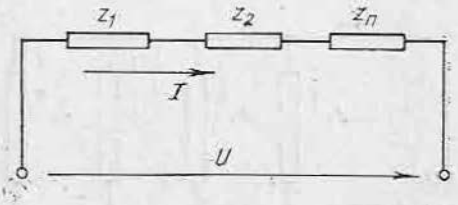


Fig. 2.26. Circuit cu mai multe impedanțe în serie.

este impedanța echivalentă a circuitului. În consecință, impedanța echivalentă a mai multor impedanțe legate în serie se obține însumîndu-se impedanțele parțiale, relație analoagă cu relația folosită în curent continuu pentru rezistențele legate în serie.

Relația (2.62) se poate scrie dezvoltat:

$$\underline{Z} = R_1 + jX_1 + R_2 + jX_2 + \ldots + R_n + jX_n = \sum_1^n R_i + j\sum_1^n X_i. \qquad (2.63)$$

În consecință, circuitul are rezistența echivalentă R și reactanța echivalentă X date de relațiile:

$$R = \sum_1^n R_i = R_1 + R_2 + \ldots + R_n; \qquad (2.64)$$

$$X = \sum_1^n X_i = X_1 + X_2 + \ldots + X_n. \qquad (2.65)$$

Curentul în circuit se determină din relația:

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}}.$$

Căderile de tensiune $\underline{U}_1, \underline{U}_2, \ldots, \underline{U}_n$ în fiecare din impedanțe se determină cu relațiile:

$$\underline{U}_1 = \underline{I}\,\underline{Z}_1; \quad \underline{U}_2 = \underline{I}\,\underline{Z}_2; \ldots; \underline{U}_n = \underline{I}\,\underline{Z}_n. \qquad (2.66)$$

2. IMPEDANȚA ECHIVALENTĂ A UNOR IMPEDANȚE LEGATE ÎN PARALEL

Considerîndu-se mai multe impedanțe $\underline{Z}_1, \underline{Z}_2, \ldots, \underline{Z}_n$ legate în paralel la aceeași sursă cu tensiunea $\underline{U}$ (fig. 2.27), se pot determina direct curenții $\underline{I}_1, \underline{I}_2, \ldots, \underline{I}_n$ în impedanțele respective:

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}_1}; \quad \underline{I}_2 = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}_2}; \ldots \underline{I}_n = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}_n}. \qquad (2.67)$$

Curentul total debitat de sursă se deduce din legea I a lui Kirchhoff:

$$\underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \ldots + \underline{I}_n = \underline{U}\left[\frac{1}{\underline{Z}_1} + \frac{1}{\underline{Z}_2} + \ldots + \frac{1}{\underline{Z}_n}\right].$$

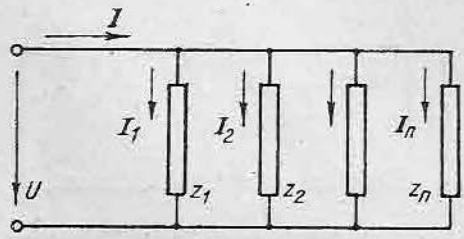


Fig. 2.27. Impedanțe în paralel.

Această relație se poate scrie și sub forma:

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}},$$

în care:

$$\frac{1}{\underline{Z}} = \frac{1}{\underline{Z}_1} + \frac{1}{\underline{Z}_2} + \ldots + \frac{1}{\underline{Z}_n} \qquad (2.68)$$

este inversul impedanței echivalente $\underline{Z}$ a impedanțelor în paralel. Se obține deci o relație analoagă cu relația pentru calculul rezistenței echivalente a mai multor rezistențe legate în paralel.

3. METODA TRANSFIGURĂRII

Rețelele de curent alternativ se pot rezolva prin metoda transfigurării, ca și cele de curent continuu, reducîndu-se rețeaua la un circuit simplu cu o singură t.e.m. și o singură impedanță, așa cum s-a procedat în cele două cazuri arătate anterior.

Dacă un circuit are impedanțe legate în serie și în paralel, se calculează o impedanță echivalentă, aplicîndu-se succesiv regula compunerii impedanțelor în paralel și în serie; apoi se determină curenții în diferite laturi, după aceleași reguli ca în curent continuu.

De asemenea, se poate aplica transfigurarea stea-triunghi, folosindu-se relațiile (1.11) și (1.12), în care rezistențele se înlocuiesc cu impedanțe.

APLICAȚIE

Rețeaua din figura 2.28 este alimentată de un generator cu tensiunea electromotoare de valoare eficace $E = 60$ V. Generatorul are rezistența interioară $R_i = 0{,}5\ \Omega$ și reactanța interioară $X_i = \omega L_i = 2\Omega$. Impedanța Z_1 are rezistența $R_1 = 2{,}5\Omega$ și reactanța capacitivă $X_1 = -30\Omega$. Impedanța Z_2 are rezistența $R_2 = 10\Omega$ și reactanța capacitivă $X_2 = -50\Omega$, iar impedanța Z_3 are rezistența $R_3 = 5\Omega$ și reactanța inductivă $X_3 = 10\Omega$. Să se determine curenții și tensiunea la bornele generatorului.

Soluție. Impedanța interioară a generatorului este: $\underline{Z}_i = R_i + jL_i = 0{,}5 + j2(\Omega)$, iar $\underline{Z}_1 = R_1 + jX_1 = 2{,}5 - j3(\Omega)$; $\underline{Z}_2 = R_2 + jX_2 = 10 - j5(\Omega)$; $\underline{Z}_3 = R_3 + jX_3 = 5 + j10(\Omega)$. Impedanțele Z_2 și Z_3 se compun în paralel și dau o impedanță echivalentă:

$$\underline{Z}_{23} = \frac{\underline{Z}_2\underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = \frac{(10 - j5)(5 + j10)}{10 - j5 + 5 + j10} = \frac{100 + j75}{15 + j5} = \frac{(20 + j15)}{(3 + j1)} =$$

$$= \frac{(20 + j15)(3 - j1)}{3^2 + 1^2} = 7{,}5 + j2{,}5\ \Omega.$$

Circuitul s-a redus la un circuit care conține în serie impedanțele $\underline{Z}_i$, $\underline{Z}_1$ și $\underline{Z}_{23}$, deci s-a redus la un circuit cu impedanța echivalentă $\underline{Z} = \underline{Z}_i + \underline{Z}_1 + \underline{Z}_{23} = 0{,}5 + j2 + 2{,}5 - j3 + 7{,}5 + j2{,}5 = (10{,}5 + j1{,}5)\ \Omega$.

Dacă se ia tensiunea electromotoare $\underline{E}$ ca origine de fază, deci $\underline{E} = 60$V, curentul în circuit este dat de relația $\underline{I} = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}} = \frac{60}{10{,}5 + j1{,}5} = 5{,}6 - j0{,}8$ A. Acesta este curentul în generator și în impedanța Z_1. Pentru calculul curenților în impe-

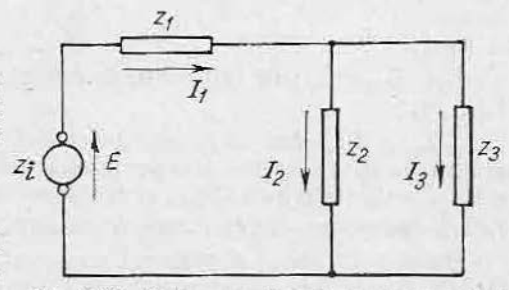


Fig. 2.28. Rețea cu impedanțe legate mixt.

danțele $\underline{Z}_2$ și $\underline{Z}_3$ se determină tensiunea $\underline{U}_{23}$ la bornele acestor impedanțe:

$$\underline{U}_{23} = \underline{I}\,\underline{Z}_{23} = (5{,}6 - \mathrm{j}\,0{,}8)(7{,}5 + \mathrm{j}\,45) = (44 + \mathrm{j}\,8)\mathrm{V}.$$

De aici se deduce:

$$I_2 = \frac{\underline{U}_{23}}{\underline{Z}_2} = \frac{44 + \mathrm{j}8}{10 - \mathrm{j}5} = 3{,}2 + \mathrm{j}2{,}4\ \mathrm{A} \quad \text{și} \quad I_3 = \frac{\underline{U}_{23}}{\underline{Z}_3} =$$

$$= \frac{44 + \mathrm{j}\,8}{5 + \mathrm{j}\,10} = (2{,}4 - \mathrm{j}\,3{,}2)\mathrm{A}.$$

Verificare:

$$\underline{I}_2 + \underline{I}_3 = 3{,}2 + \mathrm{j}\,2{,}4 + 2{,}4 - \mathrm{j}\,3{,}2 = 5{,}6 - \mathrm{j}\,0{,}8 = I.$$

Tensiunea la bornele generatorului $\underline{U} = \underline{E} - \underline{Z}_i\underline{I} = 60 - (0{,}5 + \mathrm{j}\,2)(5{,}6 - - \mathrm{j}\,0{,}8) = 55{,}6 - \mathrm{j}\,10{,}8$ V, sau, $\underline{U} = \underline{I}(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_{23}) = (5{,}6 - \mathrm{j}\,0{,}8)\ (5{,}2 - - \mathrm{j}\,3 + 7{,}5 + \mathrm{j}\,2{,}5) = (55{,}6 - \mathrm{j}\,10{,}8)$ V.

K. REZOLVAREA REȚELELOR DE CURENT ALTERNATIV PRIN METODA CURENȚILOR CICLICI

Rețelele mai complicate se pot rezolva prin metoda curenților ciclici, cunoscută de la studiul rețelelor de curent continuu. Rețeaua se descompune în $l - n + 1$ circuite în care se dă un sens arbitrar curenților ciclic $I'_1, I'_2, \ldots$ $\ldots, I'_n$. Se scriu apoi n ecuații de forma:

$$\underline{Z}_{n1}\underline{I}'_1 + \underline{Z}_{n2}\underline{I}'_2 + \ldots\ \underline{Z}_{nn}\underline{I}'_n = \Sigma E_n \tag{2.69}$$

în care:

$\underline{Z}_{11}$, $\underline{Z}_{22}$ etc. sînt impedanțele complexe ale circuitelor separate de ordinul $1,2, \ldots n$;

$\underline{Z}_{nm} = \underline{Z}_{mn}$ sînt impedanțele complexe din laturile comune circuitelor de ordinul n și m, care se iau pozitive dacă curenții ciclici de ordinul n și m au același sens în latura $\underline{Z}_{mn}$, și negative dacă au sensuri opuse; $\underline{E}_n$ este suma t.e.m. complexe din circuitul de ordinul n.

După rezolvarea sistemului de ecuații, se calculează curenții din fiecare latură, însumîndu-se curenții ciclici complecși ce trec prin fiecare latură.

PROBLEME

1. La o rețea de curent alternativ cu tensiunea $U = 120$ V, se leagă un fier de călcat cu rezistența $R = 24\Omega$. Ce curent absoarbe și ce putere are fierul de călcat?

Soluție. Curentul $I = \frac{U}{R} = \frac{120}{24} = 5$ A. Puterea $P = RI^2 = 24 \cdot 5^2 = 600$ W.

2. La o rețea de 120 V, cu frecvența $f = 50$ Hz, este conectată o inductanță $L = 38{,}2$ mH. Se cere curentul care parcurge circuitul și puterea absorbită.

Soluție. Pulsația rețelei fiind: $\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 = 314\ s^{-1}$, reactanța inductivă este: $X_L = \omega L = 314 \cdot 0{,}0382 \cong 12\Omega$. Curentul în circuit: $I = \frac{U}{X_L} = \frac{U}{\omega L} = \frac{120}{12} = 10$ A. Curentul este defazat cu $\frac{\pi}{2}$ în urma tensiunii, deci $\varphi = \frac{\pi}{2}$, $\cos\varphi = 0$, $\sin\varphi = 1$. Circuitul absoarbe numai puterea reactivă $Q = UI \sin\varphi = 120 \cdot 10 \cdot 1 = 1200$ var sau $Q = X_L I^2 = 12 \cdot 10^2 = 1\,200$ var $= 1{,}2$ kvar.

3. La o rețea cu frecvența $f = 50$ Hz și tensiunea $U = 120$ V este legată o bobină cu rezistența $R = 16\Omega$ și inductanța $L = 95{,}5$ mH, în serie cu un condensator cu capacitatea $C = 177\ \mu$F. Să se determine curentul I în circuit, factorul de putere $\cos\varphi$, tensiunea U_L la bornele bobinei, puterile active, reactive și aparente absorbite de circuit.

Soluție. Deoarece pulsația curentului este $\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 = 314 \cdot s^{-1}$, reactanța inductivă este $X_L = L\omega = 95{,}5 \cdot 10^{-3} \cdot 314 \cong 30\ \Omega$, iar reactanța capacitivă este $X_c = \frac{1}{C\omega} = \frac{1}{177 \cdot 10^{-6} \cdot 314} = 18\Omega$. Reactanța totală $X = X_L - X_c = 30 - 18 = 12\ \Omega$. Impedanța $Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{16^2 + 12^2} = 20\Omega$. Curentul $I = \frac{U}{Z} = \frac{120}{20} = 6$ A. Factorul de putere $\cos\varphi = \frac{R}{Z} = \frac{16}{20} = 0{,}8$. Impedanța bobinei $Z_b = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{16^2 + 30^2} = 34\Omega$. Tensiunea la bornele bobinei $U_b = IZ_b = 6 \cdot 34 = 204$ V $> U$. Tensiunea la bornele condensatorului $U_c = IX_c = 6 \cdot 18 = 108$ V. Puterea activă $P = UI \cos\varphi = 120 \cdot 6 \cdot 0{,}8 = 576$ W sau $P = RI^2 = 16 \cdot 6^2 = 576$ W. Deoarece $\sin\varphi = \sqrt{1 - \cos^2\varphi} = \sqrt{1 - 0{,}8^2} = 0{,}6$ puterea reactivă este $Q = UI \sin\varphi = 120 \cdot 6 \cdot 0{,}6 = 432$ var sau $Q = XI^2 = 12 \cdot 6^2 = 432$ var. Puterea aparentă $S = UI = 120 \cdot 6 = 720$ VA sau $S = ZI^2 = 20 \cdot 6^2 = 720$ VA.

4. Un circuit electric serie cu rezistență $R = 6\Omega$, reactanță inductivă $\omega L = 20\ \Omega$, și reactanță capacitivă $\frac{1}{C\omega} = 12\ \Omega$ este alimentat cu o tensiune alternativă $u = 120\sqrt{2} \sin(\omega t + 60°)$. Să se calculeze în complex curentul în circuit și $\cos\varphi$.

Răspuns. $\underline{I} = (7{,}2 - j\,9{,}6)$ A; $I_{eficace} = 12 \cos\varphi = 0{,}6$.

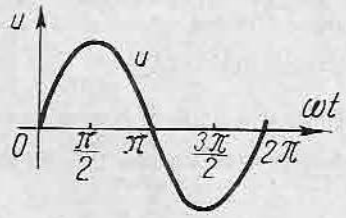
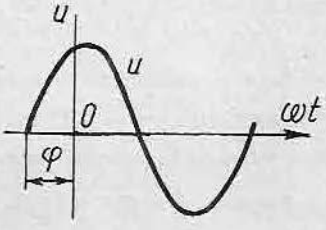
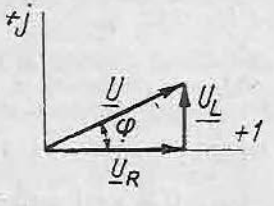
5. Un circuit format din două impedanțe în serie $\underline{Z}_1 = 1 + j\,5\Omega$ și $\underline{Z}_2 = 2 - j\,4\Omega$ este alimentat cu o tensiune având valoarea eficace 20 V. Să se calculeze curentul în circuit.

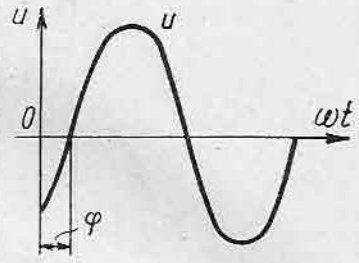
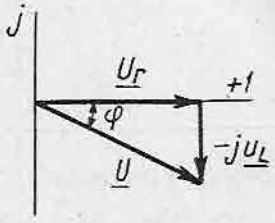
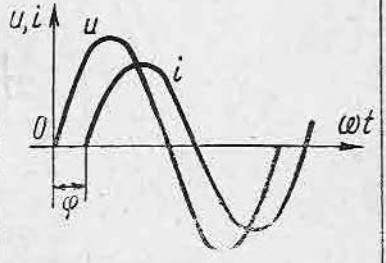
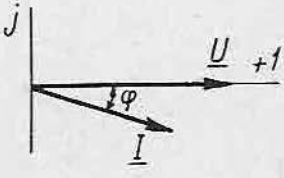
Răspuns. Se ia tensiunea $\underline{U}$ ca origine de fază; rezultă $\underline{I} = (6 - j\,2)$ A, cu valoarea eficace $I = 6{,}325$ A.

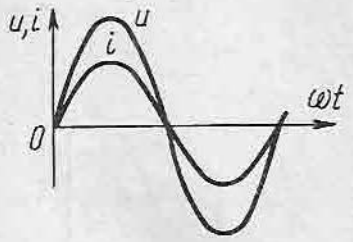
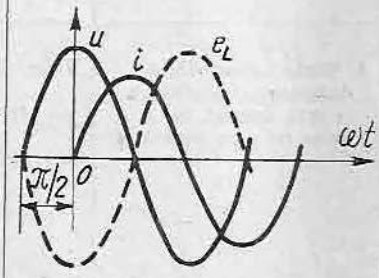
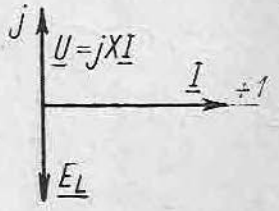
6. O bobină având $R_L = 5\Omega$ și $X_L = 15\Omega$, legată în paralel cu un rezistor cu rezistența $R = 40\Omega$, este alimentată cu o tensiune sinusoidală ca valoarea eficace $U = 220$ V. Să se calculeze curenții și puterea absorbită și să se întocmească diagrama de fazori.

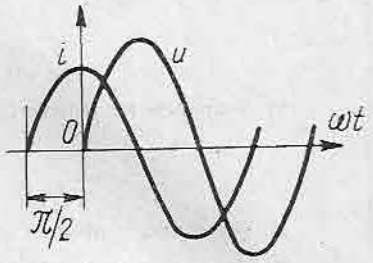
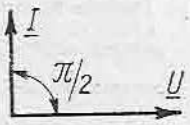
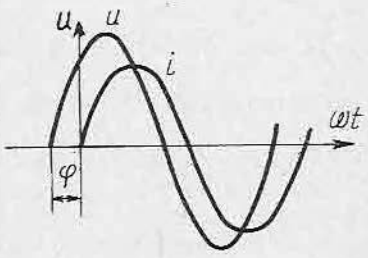
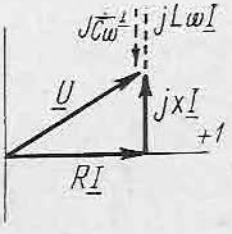
Răspuns. $\underline{I} = 9{,}9 - j\,13{,}2$ A; $I_R = 5{,}5$ A; $I_L = 4{,}4 - j\,13{,}2$ A; $P = 2180$ W

$Q = 2\,940$ var; $S = 3\,630$ VA.

Noțiunea	Expresia	Reprezentarea
1. Mărime alternativă sinusoidală (de exemplu, tensiunea). Faza inițială $\varphi = 0$	Valoarea instantanee: $n = U\sqrt{2}\sin\omega t$ în care: valorea eficace $= U$ fază inițială $\varphi = 0$	carteziană 
	Simbolică (în complex) $\underline{U} = U + j \cdot 0 = U$	diagramă fazorială
2. Mărime sinusoidală cu faza inială φ	Valoare instantanee: $u = U\sqrt{2}\sin(\omega t + \varphi)$	carteziană 
	În complex: $\underline{U} = U_r + j\,U_i$ în care: partea reală: $U_r = U\cos\varphi$ partea imaginară: $U_i = U\sin\varphi$	diagramă fazorială 

Noțiunea	Expresia	Reprezentarea
3. Mărime sinusoidală cu faza inițială $-\varphi$	Valoare instantanee $u = U\sqrt{2}\sin(\omega t - \varphi)$	carteziană 
	În complex: $\underline{U} = \underline{U}_r - jU_i$	diagramă fazorială 
4. Mărimi sinusoidale defazate cu unghiul φ (i este defazat în urma lui u cu unghiul φ)	Valori instantanee: $u = U\sqrt{2}\sin\omega t$ $i = I\sqrt{2}\sin(\omega t - \varphi)$	carteziană 
	În complex: $\underline{U} = U$ $\underline{I} = I\cos\varphi - jI\sin\varphi$	diagramă fazorială 

Noțiunea	Expresia	Reprezentarea
5. Circuit cu rezistență R (i este în fază cu U)	Valori instantanee: $u = U\sqrt{2}\sin\omega t$ $i = \frac{u}{R} = I\sqrt{2}\sin\omega t$	carteziană 
	În complex: $\underline{I} = \frac{\underline{U}}{R}$	diagramă fazorială
6. Circuit cu inductanța L (i este defazat cu $\frac{\pi}{2}$ în urma lui u)	Valori instantanee: $u = -e_L$ $i = I\sqrt{2}\sin\omega t$ $e_L = -L\omega I\sqrt{2}\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$	carteziană 
	În complex: $\underline{U} = -\underline{E}_L = +\mathrm{j}X\underline{I} =$ $= +\mathrm{j}L\omega\underline{I}$	diagramă fazorială 

Noţiunea	Expresia	Reprezentarea
7. Circuit cu capacitate C (i este defazat cu $\frac{\pi}{2}$ înaintea lui U)	Valori instantanee: $u = U\sqrt{2}\sin\omega t$ $i = C\omega U\sqrt{2}\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$	carteziană 
	În complex: $\underline{U} = -\mathrm{j}\frac{1}{C\omega}\underline{I}$	diagramă fazorială 
8. Circuit cu R, L, C în serie $L\omega > \frac{1}{C\omega}$	Valori instantanee: $u = u_R + u_L + u_C$	carteziană 
	În complex: $\underline{U} = R\underline{I} + \mathrm{j}L\omega\underline{I} - \mathrm{j}\frac{1}{C\omega}\underline{I}$ $\underline{U} = R\underline{I} + \mathrm{j}X\underline{I} = \underline{Z}\,\underline{I}$ în care $I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X^2}} = \frac{U}{Z}$ $\cos\varphi = \frac{R}{Z}$	diagramă fazorială 

9. Teorema lui Joubert:

$$\underline{U} = \underline{Z}\,\underline{I}$$

în care:

$$\underline{Z} = R + jX = R + jL\omega - j\,\frac{1}{C\omega}.$$

10. Teoremele lui Kirchhoff în complex:

$$\Sigma\,\underline{I} = 0;$$

$$\Sigma\underline{E} = \Sigma\underline{Z}\,\underline{I}.$$

11. Metode de rezolvare a rețelelor de curent alternativ:

— metoda legilor lui Kirchhoff;

— metoda transfigurării;

— metoda curenților ciclici.

12. Puterile în curent alternativ:

— puterea activă $P = UI \cos \varphi = RI^2$;

— puterea reactivă $Q = UI \sin \varphi = XI^2$;

— puterea aparentă $S = UI = ZI^2$.

Capitolul 3

MAȘINI ELECTRICE DE CURENT CONTINUU

A. NOȚIUNI GENERALE

Mașinile electrice sînt mașini care transformă lucrul mecanic în energie electrică sau invers. După transformarea care are loc, se deosebesc:

— *generatoare*, care primesc energie mecanică de la un motor primar și o transformă în energie electrică;

— *motoare*, care primesc energie electrică de la o rețea și o transformă în energie mecanică prin care se acționează o mașină de lucru (strung, macara, laminor).

Mașinile electrice sînt reversibile, adică pot funcționa atît ca motor, cît și ca generator.

Pe lîngă cele două regimuri principale de funcționare ca motor sau generator, unele mașini pot funcționa în regim de frînă, cînd primesc atît energie electrică, cît și mecanică, transformîndu-le în căldură.

Mașinile sînt caracterizate prin prezența unor piese în mișcare de translație sau rotație. La majoritatea mașinilor mișcarea fiind de rotație, mașinile electrice sînt denumite și mașini electrice rotative.

Sînt utilizate în electrotehnică și sisteme care transformă energia electrică cu anumite caracteristici (tensiune, curent, frecvență) tot în energie electrică, dar cu alte caracteristici. Acestea sînt convertizoarele rotative, convertizoarele statice, redresoarele, transformatoarele.

După felul curentului, mașinile electrice se împart în: *mașini de curent continuu* și *mașini de curent alternativ*.

Mașinile de curent alternativ se împart în:

— *mașini sincrone*, la care turația este constantă, independentă de sarcină și este numită sincronă;

— *mașini asincrone*, la care turația variază în anumite limite cu sarcina;

— *mașini de curent alternativ cu colector;*

Mașinile electrice funcționează pe baza fenomenului de inducție electromagnetică și au două părți principale: *inductorul*, care produce fluxul magnetic și *indusul*, în care se induc curenți prin fenomenul de inducție. La cele mai multe tipuri de mașini, inductorul este *stator*, iar indusul *rotor*. Statorul este partea fixă, iar rotorul, partea mobilă a mașinii electrice. Între stator și rotor există un spațiu de aer liber, numit *întrefier*.

B. MĂRIMILE NOMINALE ALE MAȘINILOR ELECTRICE ROTATIVE

Regimul (serviciul) mașinilor electrice rotative constă din ansamblul valorilor numerice ale mărimilor electrice și mecanice care caracterizează funcționarea mașinii electrice la un moment dat.

Serviciul mașinilor electrice este caracterizat de durata și succesiunea în timp a perioadelor de încărcare, mers în gol și repaus al mașinii.

Serviciul nominal este serviciul marcat prin simboluri pe plăcuța indicatoare a mașinii. Mașina este astfel construită, încît atunci cînd funcționează la serviciul nominal, diferitele părți ale ei, care se încălzesc datorită pierderilor

(bobinajele și miezul magnetic), nu depășesc anumite limite de temperatură admise de standardele de stat pentru materiale utilizate.

Pentru uniformizarea fabricației de mașini electrice, au fost stabilite cîteva servicii tip, dintre care cele mai importante sînt:

— *Serviciul continuu* (simbolizat *S1*), caracterizat prin funcționarea la puterea nominală un timp oricît de lung, fără ca temperatura bobinajelor să depășească limitele admise.

— *Serviciul de scurtă durată* (*S2*), caracterizat prin funcționarea la puterea nominală pe o durată mai scurtă decît durata necesară pentru atingerea echilibrului termic, urmată de o durată de repaus suficient de lungă pentru ca mașina să se răcească pînă la temperatura mediului ambiant (de exemplu motorul electric care acționează o barieră de cale ferată).

— *Serviciul intermitent periodic* (*S3*) caracterizat prin cicluri de funcționare identice, compuse fiecare dintr-o perioadă de funcționare la puterea nominală și o perioadă de repaus (de exemplu motorul electric al compresorului de aer la un vagon de tramvai).

— *Serviciul neîntrerupt cu sarcină intermitentă periodică* (*S6*) caracterizat prin cicluri de funcționare identice, compuse dintr-o perioadă de funcționare la puterea nominală și o perioadă de mers în gol (de exemplu un generator de sudare electrică manuală).

Mărimile nominale care definesc serviciul nominal sînt în general următoarele:

— *puterea nominală:* la motoare este puterea mecanică utilă debitată la arbore (W sau kW) la generatoare de curent continuu este puterea electrică utilă debitată la borne (W sau kW), iar la generatoare de curent electric alternativ, este puterea aparentă la borne (VA, kVA);

— *tensiunea nominală* (V): este tensiunea între bornele de conectare a mașinii la rețea;

— *tensiunea de excitație* (numai la mașini de curent continuu): este tensiunea cu care se alimentează circuitul de excitație;

— *curentul nominal* (A): este curentul corespunzător puterii și tensiunii nominale;

— *frecvența nominală* (Hz) pentru mașinile de curent alternativ;

— *turația nominală* (rot/min);

— *factorul de putere nominal.*

Toate mărimile nominale sînt indicate pe plăcuța indicatoare a mașinii.

C. ELEMENTE CONSTRUCTIVE DE BAZĂ

Mașina de curent continuu, fie că este motor sau generator, are inductorul stator și indusul rotor.

Părțile principale ale mașinii de curent continuu sînt: statorul rotorul cu colector, crucea portperii, scuturi, lagăre, cutie de borne (fig. 3.1).

● **Statorul** care produce fluxul magnetic inductor este format din carcasă, poli și bobine polare.

— *Carcasa* se execută din material magnetic (oțel) în cele mai multe cazuri de formă cilindrică.

— *Polii* care se fixează prin buloane de carcasă sînt polii principali (numiți și poli de excitație), iar la majoritatea mașinilor sînt și polii auxiliari (numiți

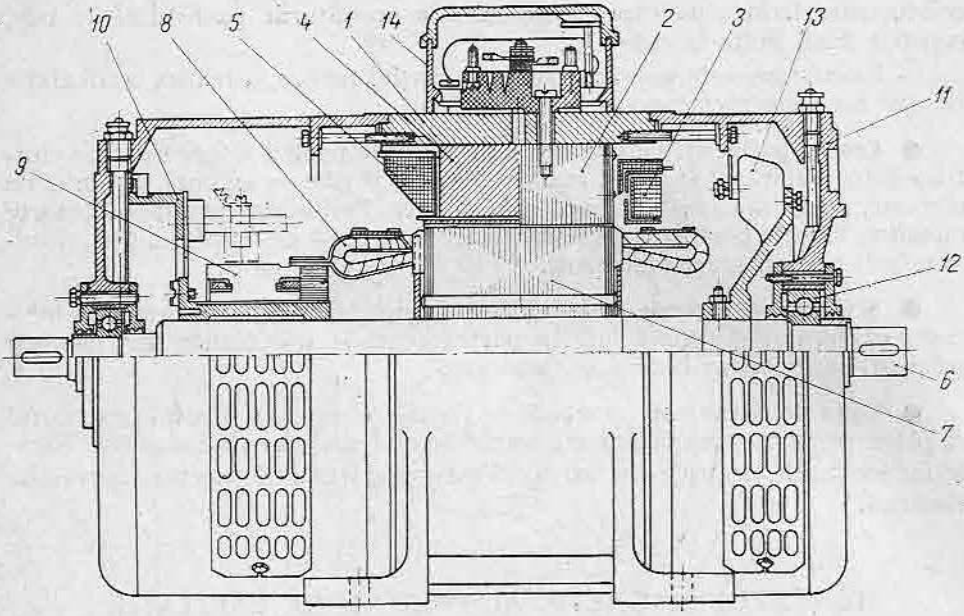


Fig. 3.1. Secțiune prin mașina de curent continuu:
1 — carcasă; *2* — pol de excitație; *3* — bobină de excitație; *4* — pol auxiliar; *5* — bobină de comutație; *6* — arbore; *7* — pachet de tole; *8* — înfășurarea indusului; *9* — colector; *10* — cruce portperii; *11* — scut; *12* — rulment; *13* — ventilator; *14* — cutie de borne.

și poli de comutație). Polii principali se execută din tole de oțel, cu grosimea de 1 — 1,5 mm strînse cu nituri.

— *Bobinele polare* care se montează pe poli sînt bobinele de excitație, parcurse de curentul de excitație și bobinele polilor auxiliari, parcurse de curentul principal al mașinii. Bobinele se execută din conductor de cupru izolat și sînt izolate față de miezul și talpa polului și față de carcasă.

● **Rotorul** este format din arbore, pachetul de tole ale rotorului, colectorul, bobinajul indus, suporți de bobinaj, ventilator.

— *Arborele* se execută din oțel, transmite cuplul mecanic între pachetul de tole și capătul de arbore liber.

— *Pachetul de tole ale rotorului* se execută din tablă silicioasă cu grosima de 0,5 mm, împachetată pe arbore și strînsă între suporții de bobinaj. Are la exterior crestături deschise sau semiînchise (fig. 3.2) în care se introduce bobinajul indus.

— *Colectorul* este format din lamele de cupru de secțiune trapezoidală, izolate între ele cu plăci de micanită și izolate față de piesele de strîngere.

— *Bobinajul indus* este format din bobine executate din

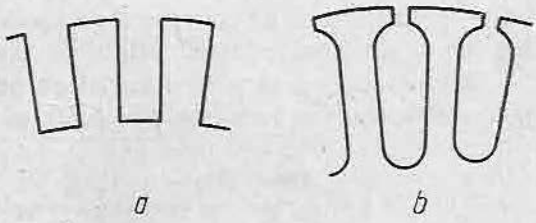


Fig. 3.2. Forma crestăturilor indusului:
a — crestături deschise; *b* — crestături semiînchise.

conductoare izolate de cupru, introduse în crestăturile pachetului de tole, capetele fiind lipite la colector.

— *Ventilatorul* este prevăzut la unele mașini pentru, a realiza o circulație de aer necesară răcirii mașinii.

● **Crucea portperii.** Pe colector freacă periile pentru a face legătura electrică între bobinajul indus și cutia de borne. Periile se execută din praf de cărbune, grafit sau praf de cupru prin presare. Periile sînt montate în casete metalice, numite portperii, care sînt fixate de o piesă de fontă sau oțel, denumită colierul sau crucea portperii.

● **Scuturile și lagărele** au rolul de a permite montarea rotorului în interiorul statorului și rotirea lui. În partea centrală a scuturilor sînt montați rulmenți sau mai rar lagăre de alunecare.

● **Cutia de borne** este montată de regulă pe carcasă și are în interiorul ei placa de borne, prevăzută cu borne de oțel sau alamă. La aceste borne se fac legăturile electrice din interiorul mașinii și legăturile electrice la rețeaua electrică.

D. CÎMPUL MAGNETIC AL POLILOR DE EXCITAȚIE

Numărul polilor de excitație este întotdeauna multiplu de 2 și se notează $2p$ în care p este numărul de perechi de poli.

Alimentînd bobinajul de excitație cu un curent i, denumit curent de excitație, se produce un cîmp magnetic, ale cărui linii de forță se închid prin carcasă, polii principali, întrefier, și rotor (fig. 3.3).

Convențional, un pol nord este un pol al statorului din care ies linii de forță spre rotor, iar un pol sud este un pol în care intră linii de forță. Bobinele polilor sînt astfel legate încît, parcurgînd statorul, după un pol N urmează un pol S, apoi un pol N și așa mai departe.

Totalitatea liniilor de forță care ies sau intră într-un pol al statorului formează *fluxul mașinii*, notat cu Φ și numit *flux inductor* sau *flux principal*. Axele care unesc doi poli opuși se numesc axe polare. Bisectoarele axelor polare se numesc axe neutre geometrice.

În figura 3.3, periile sînt figurate pe axa neutră, într-o poziție convențională, ca și cum ar freca direct pe conductoarele bobinajului indus. În realitate, periile freacă pe colector și se așază pe axa polilor, poziție în care culeg curent din conductoarele aflate pe axa neutră.

Distanța măsurată în centimetri pe periferia indusului între axele a doi poli consecutivi se numește *pas polar* și are valoarea:

$$\tau = \frac{\pi D}{2p}, \qquad (3.1)$$

în care D este diametrul indusului, în cm.

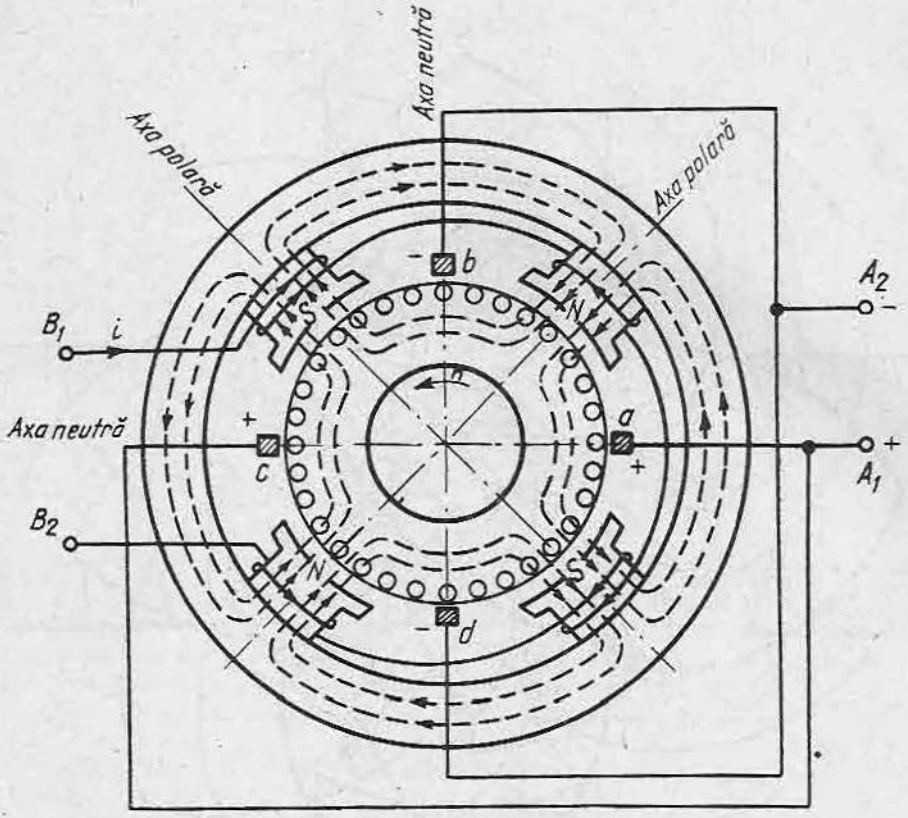


Fig. 3.3. Mașină de curent continuu cu patru poli ($2p = 4$).

E. ÎNFĂȘURĂRILE DE CURENT CONTINUU

Bobinajul rotorului, numit și înfășurarea rotorului, este format din bobine identice, introduse în crestăturile indusului și legate la colector.

După modul de legare a bobinelor la colector se deosebesc două tipuri principale de bobinaje: *bobinajul buclat* și *bobinajul ondulat*.

1. BOBINAJUL BUCLAT

În fig. 3.4 este reprezentat un rotor văzut dinspre colector. Plecînd de la lamela *1*, o spiră completă cuprinde conductorul *1*, legătura din spate, conductorul *1'* și se ajunge la lamela 2. Spira avînd forma unei bucle, bobinajul este numit buclat. De la lamela *2* începe altă spiră ș.a.m.d. Toate spirele ce se parcurg pornind de la peria *A1* la peria *A2*, prin lamelele *1, 2, 3, 4, 5*, formează o *cale de curent*. Pe o cale de curent, toate tensiunile electromotoare induse în conductoare trebuie să fie în același sens. Deoarece sensul de parcurgere al conductorului *1'* este invers decît la conductorul *1* cele două conductoare trebuie să fie distanțate cu un pas polar, pentru a se găsi sub poli cu nume diferite.

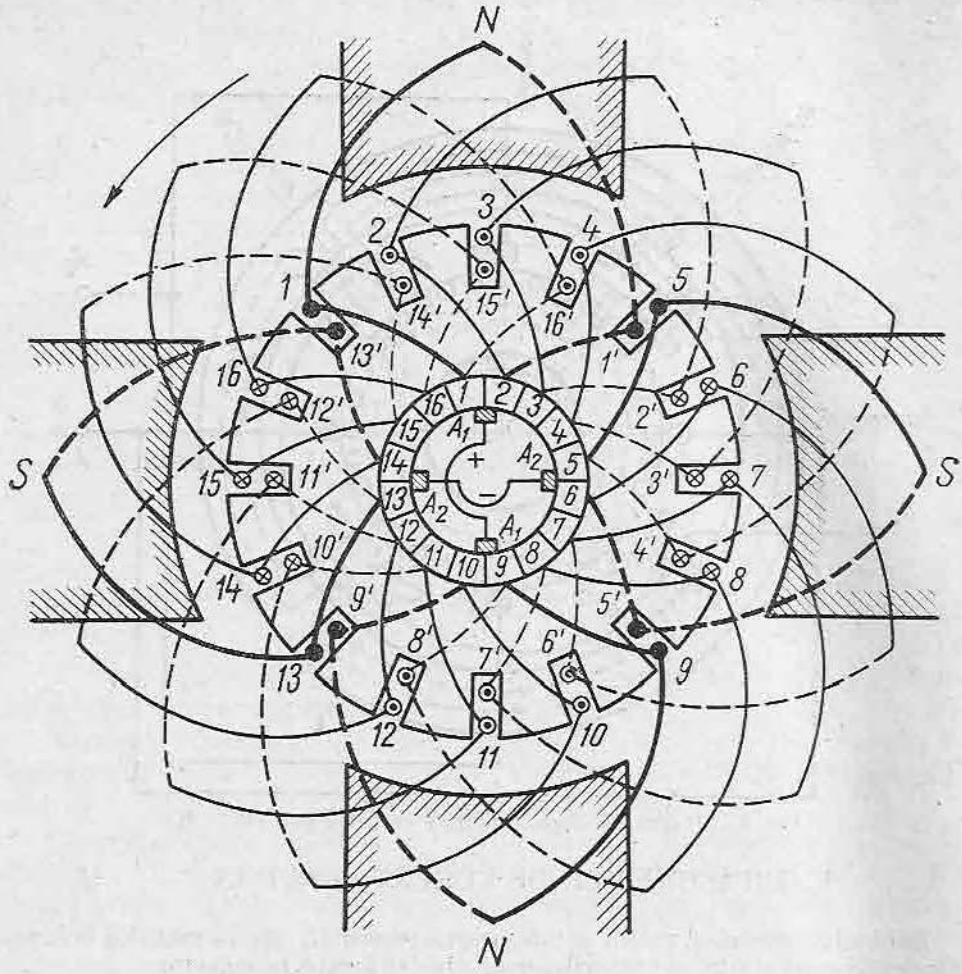


Fig. 3.4. Schema frontală a bobinajului buclat.

Schema din figura 3.4 se numeşte frontală. Bobinajele se reprezintă frecvent în reprezentare desfăşurată ca în figura 3.5, obţinută prin desfăşurarea pe un plan a suprafeţei cilindrice exterioare a rotorului. În ambele scheme, conductoarele din stratul superior sînt desenate cu linie continuă, iar cele din stratul inferior cu linie întreruptă.

În practică, înfăşurările indusurilor de curent continuu sînt mai complicate decît cele reprezentate mai înainte. În primul rînd, între două lamele de colector nu se află o singură spiră, ci mai multe spire, formînd împreună o secţie. În al doilea rînd, de cele mai multe ori, numărul de lamele de colector este mai mare decît numărul de crestături, astfel încît într-o aceeaşi crestătură sînt plasate spirele aparţinînd mai multor secţii diferite.

Urmărind căile de curent pe schema din figura 3.4, se constată că s-au obţinut patru căi de curent corespunzătoare conductoarelor *1* la *4'*, *5* la *8'*, *9* la *12'* şi *13* la *16'*, ajungînd din nou la lamela *1* unde bobinajul se închide.

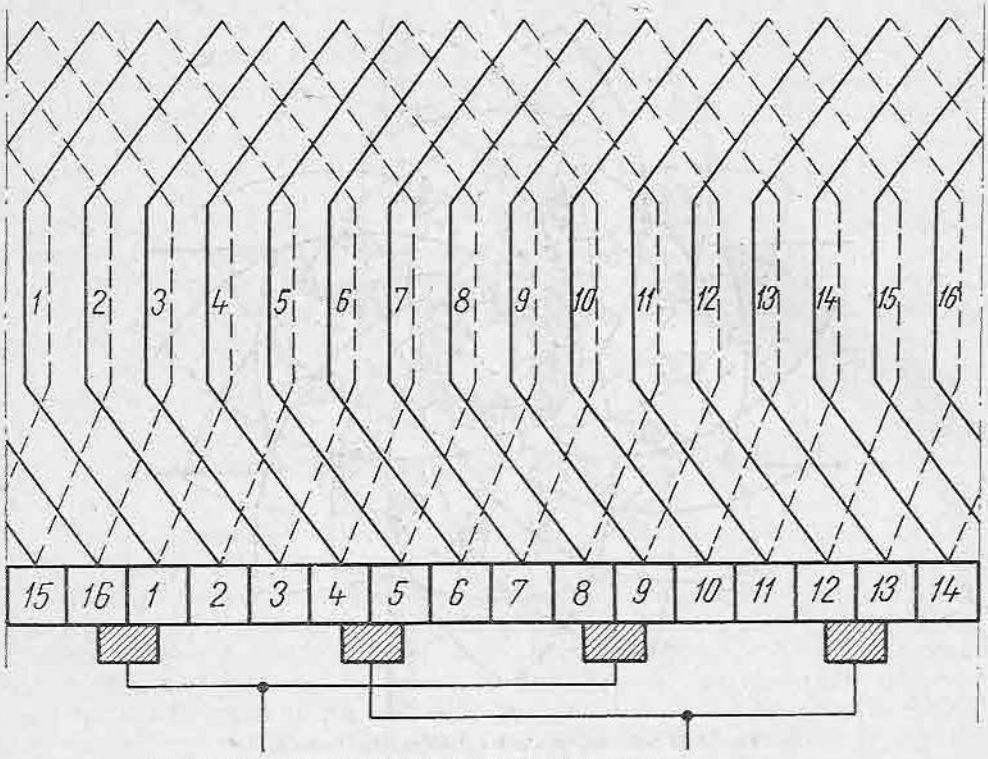


Fig. 3.5. Schema desfășurată a bobinajului buclat.

Deci, legînd capetele unei spire la două lamele alăturate (de la lamela *1* la *2*) s-a obținut la mașina cu $2p = 4$ poli un număr de căi de curent $2a = 4$ căi; deci $2a = 2p = 4$. Un astfel de bobinaj buclat, în care $2a = 2p$ se numește *bobinaj buclat simplu*.

Dacă la bobinajul buclat capetele spirei se leagă nu la două lamele alăturate ci de la lamela *1* la *3* sau *1* la *4*, se vor obține mai multe căi de curent, adică $2a = q2p$, în care q se numește *factor de multiplicitate*. Un astfel de bobinaj se numește *bobinaj buclat multiplu*.

2. BOBINAJUL ONDULAT

La acest tip de bobinaj, spirele sînt așezate ca și la bobinajul buclat, adică laturile spirei sînt situate în crestături distanțate cu un pas polar (sau apropiate de un pas polar). Deosebirea constă în legarea capetelor spirei la colector. Acestea, în loc să mai fie legate la două lamele de colector apropiate *1—2* sau *1—3*, sînt legate la două lamele situate aproape de 2τ, adică un dublu pas polar. Din această cauză spirele reprezentate în scheme au forma unor ondulații, de unde și numele de bobinaj ondulat (fig. 3.6 și fig. 3.7).

Urmărindu-se pe figura 3.6 căile de curent formate, se constată că există numai două căi de curent și anume:

a) peria +, lamela *5*, conductor *13'*, *13*, lamela *13*, conductorul *6'*, *6*, etc., conductor *15'*, *15*, lamela *15*, conductor *8'*, *8*, lamela *8*, peria —;

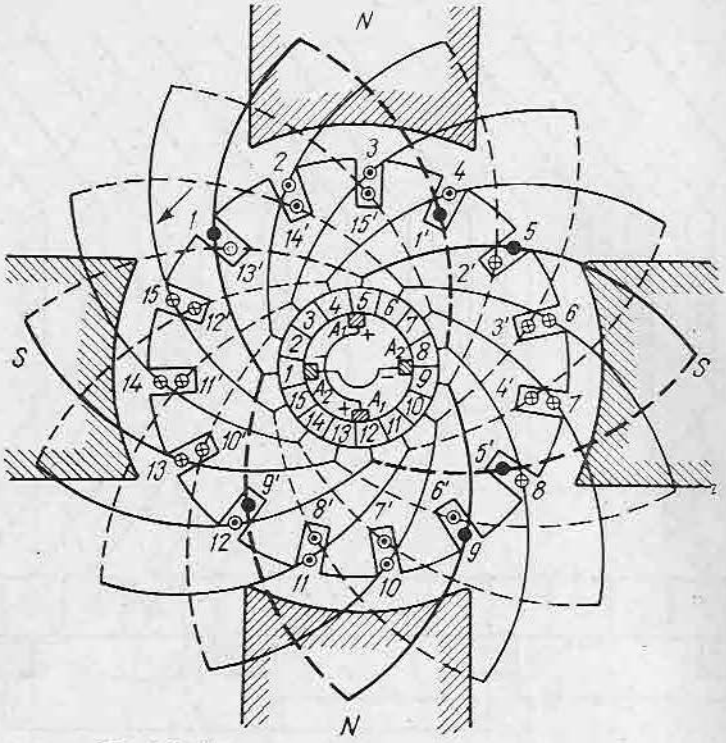


Fig. 3.6. Schema frontală a bobinajului ondulat.

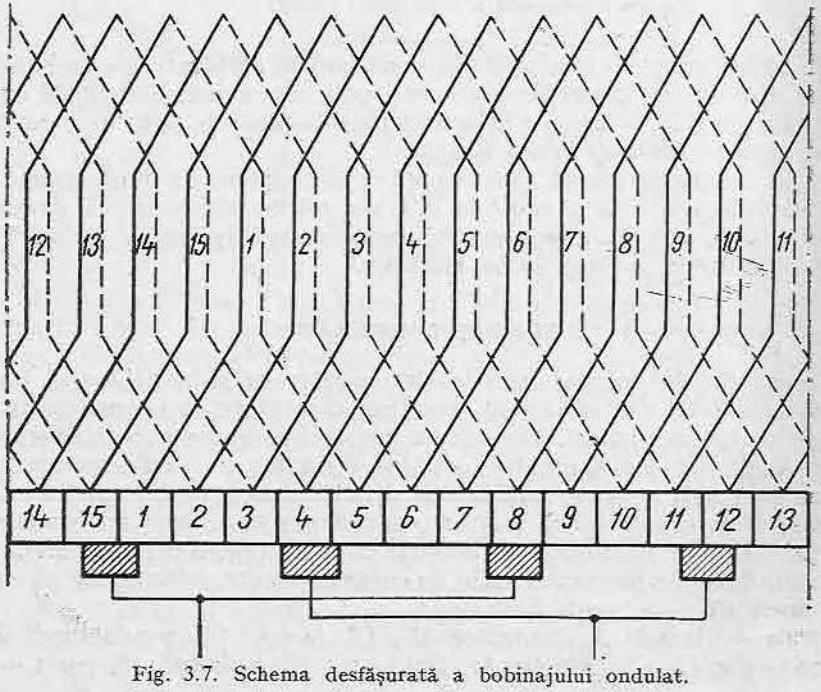


Fig. 3.7. Schema desfășurată a bobinajului ondulat.

b) perie +, lamela *4*, conductor *4, 4'*, lamela *11*, conductor *11, 11'*, lamela *3* etc. lamela *2*, conductor *2, 2'*, lamela *9*, perie —.

Se observă că există spire care scurtcircuitează două perii de același semn, de exemplu lamela *1*, conductorul *1, 1'*, lamela *8*, și care nu formează căi de curent între două perii de semn contrar.

Deci, la bobinajul reprezentat în figura 3.6, deși numărul de poli este $2p = 4$, s-au obținut numai $2a = 2$ căi de curent. Bobinajul ondulat la care numărul de căi de curent este $2a = 2$, indiferent de numărul polilor se numește bobinaj ondulat serie (sau bobinaj ondulat simplu).

Există și bobinajele ondulate cu număr mai mare de căi de curent decît 2, obținute prin modificarea legăturii la colector. Aceste bobinaje se numesc:

serie paralel, cînd $2 < 2a < 2p$;

paralel simplu, cînd $2a = 2p$;

paralel multiplu, cînd $2a > 2p$.

F. TENSIUNEA ELECTROMOTOARE INDUSĂ

Pentru a examina funcționarea mașinii de curent continuu să studiem mai întîi cel mai simplu generator de curent alternativ.

● **Funcționarea unui generator de curent alternativ cu o singură spiră.** În figura 3.8, *a* este reprezentat un generator cu o singură spiră, care are capetele legate la două inele, pe care freacă periile *A*, *B* și care se rotește în cîmpul magnetic uniform produs de polii *N* — *S*. Conductoarele *ab* și *cd* ale spirei în timpul rotirii taie linii de forță ale cîmpului magnetic. În ele se va induce o t.e.m. al cărei sens se stabilește cu regula mîinii drepte și care este proporțională cu B_r — componenta inducției normală pe direcția deplasării.

Luînd ca origine a unghiurilor α axa neutră, la $\alpha = 0$, cele două conductoare nu taie linii de forță, $B_r = 0$, iar t.e.m. indusă este nulă. La $\alpha = \frac{\pi}{2}$, cînd conductorul *ab* ajunge în axa polului *N* (poziția din figură), conductorul taie linii de forță, B_r este maxim, iar în conductor se induce t.e.m. maximă care are sensul de la *b* spre *a*. Peria *A* este pozitivă, iar peria *B* negativă. Între $\frac{\pi}{2}$ și π, B_r scade și de asemenea scade și t.e.m. pînă la zero la $\alpha = \pi$. Continuînd rotirea, conductorul *ab* ajunge în dreptul polului sud și conform regulii mîinii drepte, t.e.m. indusă are sensul schimbat de la *a* spre *b*. Peria *B* devine pozitivă, iar peria *A* negativă. Cînd conductorul ajunge în axa polului sud, la $\alpha = \frac{3\pi}{2}$, t.e.m. are valoarea maximă în sens invers decît la $\alpha = \frac{\pi}{2}$. Cînd conductorul ajunge la $\alpha = 2\pi$, adică în poziția inițială, t.e.m. indusă scade din nou la zero.

Se constată că t.e.m. indusă în spiră, care se poate măsura la periile *AB*, este alternativă sinusoidală.

● **Funcționarea unui generator de curent continuu cu o singură spiră.** În figura 3.8, *b* este reprezentată o mașină similară cu cea din figura 3.8, *a*, însă în loc de inele, este prevăzută cu două lamele de colector la care sînt legate capetele spirei. Fenomenele ce se petrec în spiră sînt aceleași, însă

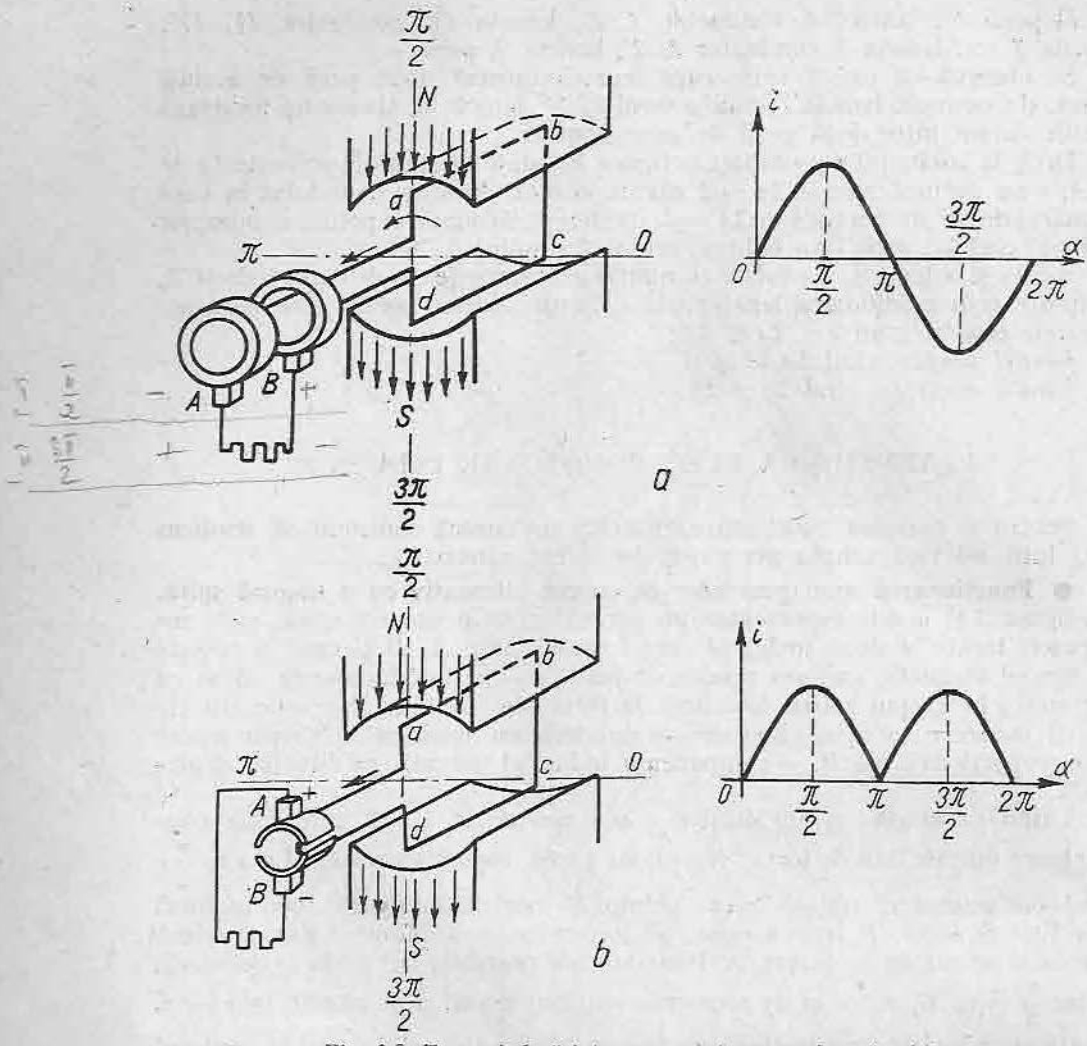


Fig. 3.8. T.e.m. indusă într-un generator cu o singură spiră:
a — generator de curent alternativ; *b* — generator de curent continuu.

trebuie observat că de la $\alpha = 0$ la $\alpha = \pi$, cînd t.e.m. în conductorul *ab* este de la *b* la *a*, peria *A* este în contact cu lamela conductorului *ab* și este pozitivă. Între $\alpha = \pi$ și $\alpha = 2\pi$, peria *A* este în contact cu lamela conductorului *cd*, care are t.e.m. indusă cu sensul de la *c* la *d* și deci peria *A* rămîne tot pozitivă. T.e.m. ce se măsoară la periile *A*, *B* este o tensiune periodică, însă cu același sens, numită *pulsatorie*, obținută prin redresarea t.e.m. alternative. Deci colectorul mașinii de curent continuu redresează curentul alternativ indus în bobinajul indusului.

● **Tensiunea electromotoare indusă.** Să examinăm mașina de curent continuu cu mai multe spire, din figura 3.3. Conform celor văzute anterior,

în toate conductoarele din zona cuprinsă între periile $a—b$ tensiunile electromotoare cresc de la zero, în axa neutră, pînă la maxim, în axa polară, și scad din nou pînă la zero, în axa neutră, dar toate aceste tensiuni electromotoare sînt îndreptate de la peria b spre peria a, deci peria a este în permanență pozitivă, iar peria b, negativă. Deoarece polaritatea periilor nu se schimbă, rezultă în același timp că între perii se obțin tensiuni electromotoare continue.

Tensiunea electromotoare continuă dintre două perii consecutive (de exemplu a și b) este egală cu suma tensiunilor electromotoare din conductoarele cuprinse între aceste două perii. Din cauza simetriei, tensiunile electromotoare obținute pe celelalte căi de curent, între periile $b—c$, $d—a$ și $d—c$, sînt egale și periile pot fi legate în paralel la placa de borne.

Deoarece căile de curent sînt legate în paralel, t.e.m. indusă, măsurată la perii, este egală cu t.e.m. indusă într-o cale de curent.

Pentru a calcula t.e.m. pe o cale de curent, se poate considera că în fiecare conductor se induce o t.e.m. medie e_m, care se poate calcula în funcție de inducția medie în întrefier B_m, cu relația:

$$e_m = B_m l v. \tag{3.2}$$

Notîndu-se cu N numărul total de conductoare în înfășurarea indusului, rezultă că pe o cale de curent se găsesc $\frac{N}{2a}$ conductoare și deci t.e.m. pe o cale de curent rezultă:

$$E = \frac{N}{2a} e_m = \frac{N}{2a} B_m l v.$$

Înlocuind în această relație:

$$B_m = \frac{\Phi}{\tau l} \quad \text{în care} \quad \tau = \frac{\pi D}{2p}$$

și

$$v = \frac{\pi D n}{60}$$

[s-a împărțit cu 60 deoarece n (turația mașinii) este dată în rot/min, iar v este dată în m/s] rezultă:

$$E = \frac{N}{2a} \cdot \frac{\Phi}{\frac{\pi D}{2p} l} \cdot l \cdot \frac{\pi D n}{60} = \frac{p}{a} N \frac{n}{60} \Phi \tag{3.3}$$

în care: E este t.e.m., în V;
Φ este fluxul, în Wb;
n este turația, în rot/min.

Deoarece p, a, N sînt constante pentru o anumită mașină, se poate face înlocuirea $K_e = \frac{p}{a} \frac{N}{60}$ și rezultă:

$$E = K_e n \Phi \tag{3.4}$$

relație care arată că t.e.m. indusă este proporțională cu turația indusului și fluxul magnetic inductor.

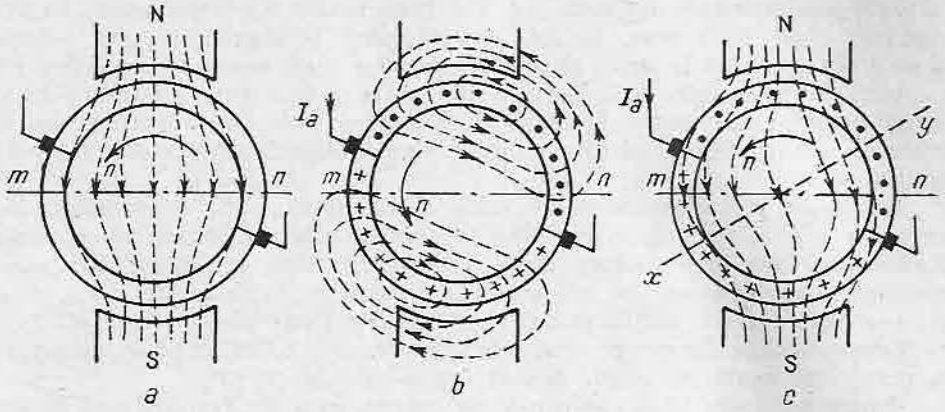


Fig. 3.9. Reacția indusului în mașinile de curent continuu.

G. REACȚIA INDUSULUI

Pînă în prezent s-a considerat că în mașină există numai cîmpul magnetic produs de inductor (fig. 3.9, *a*). Acest lucru este adevărat atît timp cît indusul nu este parcurs de curent, sau — după cum se spune — mașina merge în gol.

La mersul în sarcină, indusul este parcurs de curentul I_a, producînd și el un cîmp magnetic, denumit *cîmp de reacție* (fig. 3.9, *b*). Pentru a generaliza, s-a presupus că periile au o poziție oarecare, diferită de axa neutră geometrică.

Cîmpurile magnetice ale indusului și inductorului se compun într-un cîmp magnetic rezultant, ale cărui linii de forță sînt reprezentate în figura 3.9, *c*. În zonele în care cîmpul inductor din figura 3.9, *a* are același sens cu cîmpul de reacție din figura 3.9, *b*, cîmpul rezultant se intensifică, iar în zonele în care cele două cîmpuri au sensuri contrare, cîmpul rezultant este slăbit. Ca urmare a deformării cîmpului rezultant, acesta nu mai are componenta radială nulă în axa neutră geometrică *mn*, ci după o axă *xy*, numită axă neutră fizică.

Pe lîngă aceasta, datorită fenomenului de saturație magnetică, reacția indusului provoacă și o micșorare a fluxului inductor, deoarece creșterea fluxului în zona în care cîmpurile (de reacție și principal) se adună nu compensează total scăderea fluxului în zona în care cîmpurile se scad.

În concluzie, reacția indusului are ca efect:

— deformarea cîmpului magnetic inductor și decalarea axei neutre;

— micșorarea fluxului inductor.

H. COMUTAȚIA MAȘINII DE CURENT CONTINUU

În timpul rotației indusului, spirele bobinajului indusului trec dintr-o cale de curent în altă cale de curent, și în același timp, se schimbă sensul curentului în spiră. Pe de altă parte, la trecerea periei de pe o lamelă de colector pe alta, se produce scurtcircuitarea spirei care are capetele legate la aceste două lamele.

Inversarea sensului curentului din spiră și scurtcircuitarea spirei la trecerea periei de pe o lamelă pe alta produce o serie de fenomene electromagnetice, numite în ansamblu *comutație*.

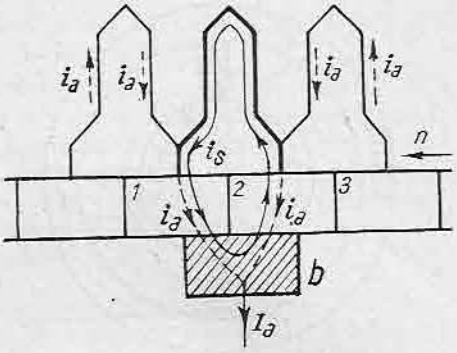


Fig. 3.10 Spira în comutație.

Notîndu-se cu $i_a = \frac{I_a}{2a}$ curentul într-o cale de curent, la trecerea pe sub perii, curentul își schimbă valoarea de la $+i_a$ la $-i_a$, într-un interval de timp Δt. Datorită acestei variații a curentului i, în spira în comutație se induce o tensiune electromotoare e de autoinducție, de valoare:

$$e_s = -L_s \cdot \frac{\Delta i}{\Delta t} \tag{3.5}$$

în care L_s este inductanța spirei considerate. Această tensiune electromotoare produce un curent suplimentar i_s, care se închide prin spira ce comutează, lamela *1*, peria *b* și lamela *2* (fig. 3.10).

Valoarea lui este:

$$i_s = \frac{e_s}{R_s}$$

în care R_s este rezistența circuitului prin care se închide curentul i_s. Deoarece rezistența R_s este mică, curentul i_s are valori mari. Curentul i_s și curentul i_a se adună în zona de contact între perie și lamela *1* care părăsește peria. Ca urmare a creșterii curentului în această zonă, marginea respectivă a periei se încălzește puternic și apar scîntei între perie și lamelele de colector. Scînteile distrug peria și ard colectorul, așa încît comutația cu scîntei nu este admisă, dacă scînteile depășesc o anumită intensitate.

Pentru eliminarea scînteilor se folosesc două categorii de mijloace:

— perii care nu favorizează formarea scînteilor;

— se induce în spira în comutație o tensiune electromotoare e_c, egală și de sens contrar cu e_s, care să anuleze curentul suplimentar i_s. În acest scop se folosește decalarea periilor pe colector sau se prevede mașina cu poli speciali, denumiți *poli auxiliari* sau *de comutație*.

● **Decalarea periilor.** Periile se decalează din axa neutră, cu scopul ca conductoarele spirei scurtcircuitate de perie să se găsească în cîmpul magnetic al polilor principali, însă la marginea zonei polare, unde acest cîmp este de valoare mică, astfel ca în spiră să se inducă o tensiune electromotoare e_c egală și de sens contrar cu e_s. Pentru ca sensul t.e.m. e_c să fie contrar lui e_s, periile se decalează la generator în sensul rotației indusului, iar la motor, în sens contrar rotației indusului.

Mărimea t.e.m. e_c depinde de unghiul de decalare al periilor și este cu atît mai mare cu cît decalarea este mai mare.

Decalarea periilor pentru îmbunătățirea comutației se utilizează numai la mașinile de putere mică și cu sarcina constantă. Cînd sarcina este variabilă e_s este variabilă și ar urma să se modifice mereu decalajul periilor.

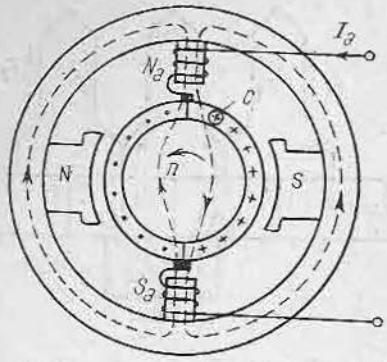


Fig. 3.11 Ameliorarea comutației cu polii auxiliari.

● **Polii auxiliari sau de comutație.** Polii auxiliari (fig. 3.11) produc un cîmp local B_c, numai în zona unde se găsesc conductoarele spirelor în comutație (zona neutră): acești poli sînt deci plasați în spațiul liber dintre polii principali $N - S$, în zona neutră geometrică. Polii auxiliari sînt excitați de curentul de sarcină I_a și produc un cîmp proporțional cu acest curent. Comutația este bună la orice sarcină, deoarece cîmpul B_c variază proporțional cu sarcina, fără nici un reglaj.

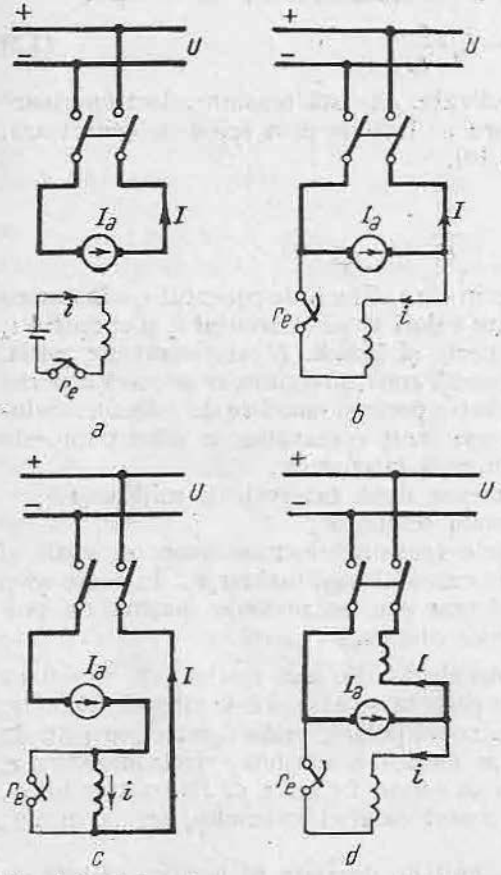


Fig. 3.12. Schemele generatoarelor de curent continuu:

a — cu excitație separată; *b* — cu excitație derivație; *c* — cu excitație serie; *d* — cu excitație mixtă.

I. GENERATOARE DE CURENT CONTINUU

1. SISTEMELE DE EXCITAȚIE ALE GENERATOARELOR DE CURENT CONTINUU

În figura 3.12 (în care s-a notat cu i — curentul de excitație, cu I_a curentul în indus, cu I — curentul de sarcină debitat în rețeaua cu tensiunea U) sînt indicate sistemele de excitație ale generatoarelor de curent continuu și anume:

— generatoare cu excitație separată, care primesc curentul de excitare de la o sursă separată de curent;

— generatoare cu excitație derivație, la care bobinajul de excitație este alimentat cu tensiunea U de la bornele generatorului;

— generatoare cu excitație serie, la care bobinajul de excitație este parcurs în serie de curentul de sarcină I al generatorului;

— generatoare cu excitație mixtă (compound) care au o excitație derivație alimentată de la perii și una serie parcursă de curentul I.

Pentru reglarea curentului de excitație, se folosește un reostat de excitație.

Generatoarele electrice sînt antrenate cu viteză constantă, astfel încît tensiunea lor electromotoare E, conform relației (3.4), este proporțională cu fluxul Φ al mașinii. La mersul în gol curentul de sarcină I este zero; prin rotor trece numai curentul i de excitație, dacă mașina are o excitație derivație. La funcționarea în gol, interesează să se cunoască variația tensiunii U_0 la bornele generatorului, în funcție de curentul de excitație i; curba U_0 funcție de i se numește *caracteristică de mers în gol*.

● **Generatorul cu excitație separată.** Schema pentru ridicarea caracteristicii (obținerea caracteristicii) la platforme de încercare este indicată în figura 3.13 (întrerupătorul K fiind deschis). Deoarece generatorul nu debitează curent și nu se produc căderi de tensiuni în bobinajul indus, tensiunea U_0 măsurată de voltmetru este chiar tensiunea electromotoare E indusă în mașină. Notîndu-se cu E_0 valoarea tensiunii electromotoare la mersul în gol: $U_0 = E_0 = k_e \Phi n$. Variindu-se, cu ajutorul reostatului r_e, curentul i de excitație de la zero la o valoare maximă i_M, caracteristica are aspectul din figura 3.14, curba *1*. Forma în S a caracteristicii este determinată de următorii factori:

— pentru $i = 0$, fluxul în mașină nu este nul; în mașină există un flux remanent (datorită magnetizării din funcționările anterioare), ceea ce face

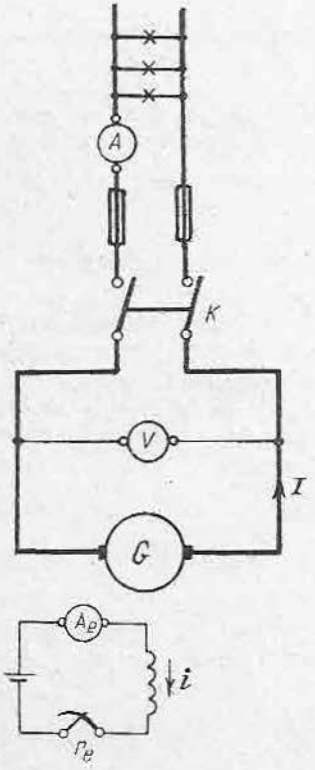
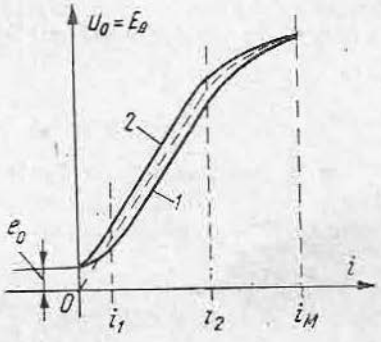


Fig. 3.13 Schema de montaj a generatorului cu excitație separată.

Fig. 3.14. Caracteristica de mers în gol a generatorului cu excitație separată.



ca, la $i = 0$, mașina să producă o tensiune electromotoare e_0 egală cu aproximativ 2—5% din tensiunea nominală:

— pentru i cuprins între i_1 și i_2, fluxul Φ și tensiunea U_0 obținută variază proporțional cu i;

— pentru i mai mare ca i_2, circuitul magnetic se saturează, fluxul și tensiunea la borne cresc mai puțin decît proporțional cu i.

Reducînd din nou curentul de excitație la zero, se obține curba 2. La același curent de excitație, tensiunea pe curba 2 este mai mare decît pe curba 1, din cauza fenomenului de histerezis.

Curba medie trasată cu linie întreruptă este considerată caracteristica de mers în gol a generatorului.

● **Generatorul cu excitație derivație.** Caracteristica de mers în gol are aproximativ același aspect ca la generatorul cu excitație separată. Diferit față de cele arătate anterior este faptul că prin indus circulă curentul i, însă cum acesta are o valoare mică, se poate considera $U_0 \simeq E_0$.

Funcționarea generatorului cu excitație derivație este posibilă numai dacă acesta are un flux remanent care să amorseze procesul de autoexcitație. Fluxul remanent produce o mică tensiune electromotoare e_0 care dă naștere unui mic curent de excitație și unui flux suplimentar. Dacă legăturile bobinajului de excitație sînt astfel făcute încît fluxul suplimentar să se adune cu cel remanent, fluxul în mașină crește, crește tensiunea electromotoare indusă E_0, crește curentul de excitație care mărește, la rîndul său, fluxul și așa mai departe.

● **Generatorul cu excitație serie.** Nu poate funcționa în gol, deoarece curentul de excitație I este și curent de sarcină.

● **Generatorul cu excitație mixtă.** Are aceeași caracteristică de mers în gol ca și generatorul cu excitație derivație, deoarece excitația serie nu este parcursă de curent.

3. FUNCȚIONAREA ÎN SARCINĂ A GENERATOARELOR DE CURENT CONTINUU

caract. ext.

La funcționarea în sarcină, generatorul debitează un curent de sarcină I; interesează modul cum variază tensiunea U în funcție de I, adică curba $U = f(I)$ care se numește *caracteristica externă a generatorului*.

În sarcină, t.e.m. E poate fi diferită de t.e.m. E_0 de mers în gol, iar din cauza rezistențelor bobinajelor și căderii de tensiune la perii, se produce o cădere de tensiune ΔU, astfel încît U este mai mic decît E:

$$U = E - \Delta U. \tag{3.6}$$

În cele ce urmează este neglijată căderea de tensiune la perii.

● **Generatorul cu excitație separată**, avînd curentul de excitație constant, are t.e.m. E în sarcină constantă și egală cu E_0. Notînd cu R_a rezistența indusului și a polilor auxiliari, ecuația (3.6) devine:

$$U = E - R_a I \tag{3.7}$$

iar caracteristica din figura 3.15 este o dreaptă.

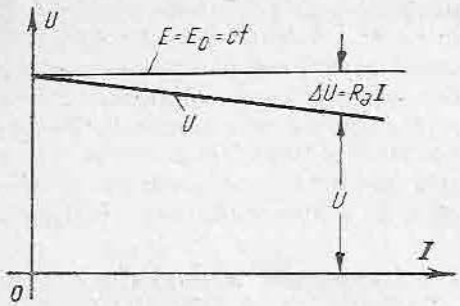


Fig. 3.15. Caracteristica externă a generatorului cu excitație separată.

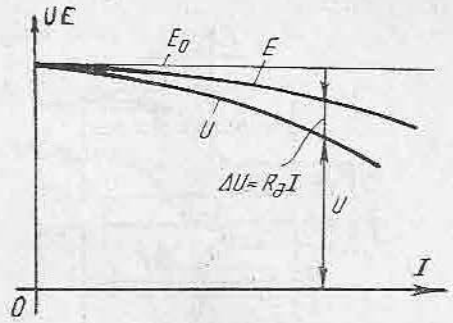


Fig. 3.16. Caracteristica externă a generatorului cu excitație derivație.

● **Generatorul cu excitație derivație** are curentul de excitație i dependent de tensiunea U. Din această cauză t.e.m. E este mai mică decît E_0 și scade pe măsură ce crește sarcina. Expresia tensiunii la borne este:

$$U = E - R_a(I + i), \tag{3.8}$$

iar caracteristica este arătată în figura 3.16.

● **Generatorul cu excitație serie.** Notînd cu R_p rezistența echivalentă a excitației serie în paralel cu reostatul de excitație, expresia tensiunii la borne este:

$$U = E - (R_a + R_p)I. \tag{3.9}$$

Curentul de excitație este chiar curentul de sarcină și deci E crește mult odată cu curentul I. Scăzînd căderea de tensiune ΔU rezultă caracteristica din figura 3.17, în care se vede că U variază foarte mult cu sarcina, din care cauză generatorul cu excitație serie este folosit numai în aplicații speciale.

● **Generatorul cu excitație mixtă.** Notînd cu R_s rezistența bobinajului de excitație serie, expresia tensiunii la borne este:

$$U = E - R_a(I + i) - R_sI. \tag{3.10}$$

Fluxul excitației serie poate fi de același sens sau de sens contrar cu fluxul excitației derivație. În primul caz, excitația generatorului este denumită *adițională*, iar în al doilea caz, *diferențială*. La generatorul cu excitație adițională, prin creșterea fluxului datorită curentului de sarcină, tensiunea la borne poate fi menținută aproximativ constantă (curba 1, fig. 3.18), sau

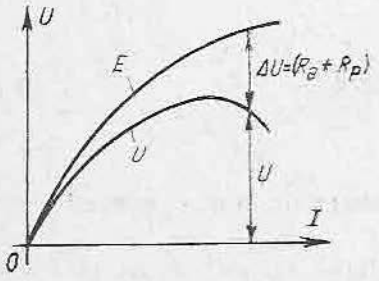


Fig. 3.17. Caracteristica externă a generatorului cu excitație serie.

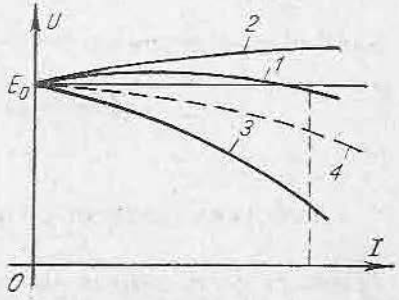


Fig. 3.18. Caracteristicile externe ale generatoarelor cu excitație mixtă.

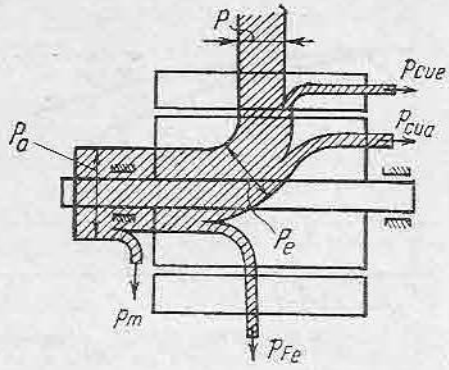


Fig. 3.19. Circulația puterilor în generatorul de curent continuu.

poate chiar crește peste tensiunea de mers în gol (curba *2*). Pe figură s-a trasat pentru comparație și caracteristica externă a generatorului, cînd lipsește excitația serie (curba *4*). În cazul excitației diferențiale curentul de sarcină demagnetizează mașina și tensiunea la borne scade mult (curba *3*).

4. PIERDERILE ȘI RANDAMENTUL GENERATOARELOR DE CURENT CONTINUU

Generatorul primește de la motorul său primar puterea P_a (fig. 3.19). Din această putere se scad pierderile de putere p_m datorite frecărilor mecanice (frecări în lagăre, frecări între perii și colector, frecarea indusului cu aerul); pierderile p_m se numesc pierderi mecanice. Tot din puterea P_a se scad pierderile de putere p_{Fe}, produse prin curenți turbionari și histerezis, datorite rotației indusului în fluxul mașinii, numite pierderi în fier. Puterea rămasă P_e:

$$P_e = P_a - p_m - p_{Fe}$$

se numește putere electromagnetică și se transformă integral în putere electrică, putînd fi scrisă sub forma:

$$P_e = EI_a.$$

Din puterea electrică se scad pierderile electrice în cupru $p_{Cu} = R_a I_a^2$ în indusul mașinii și pierderile p_e în excitația mașinii și rezultă puterea utilă P.

Notîndu-se cu Σp suma pierderilor mecanice, în fier și cupru puterea utilă debitată de generator la borne este:

$$P = P_a - \Sigma p. \tag{3.11}$$

Puterea utilă la generatoare se poate scrie în funcție de U și I:

$$P = UI. \tag{3.12}$$

Randamentul generatoarelor este:

$$\eta = \frac{P}{P_a} = \frac{P}{P + \Sigma p} = \frac{UI}{UI + \Sigma p}. \tag{3.13}$$

5. REGLAREA TENSIUNII LA GENERATOARELE DE CURENT CONTINUU

Tensiunea generatoarelor de curent continuu se poate regla prin modificarea t.e.m. E și deci a fluxului Φ (reglajul se face la n = const.). Pentru modificarea fluxului, se modifică curentul de excitație cu ajutorul reostatului

de cîmp. La creșterea curentului de excitație, crește tensiunea la borne și invers.

În practică, este necesar să se mențină tensiunea U la borne constantă, atunci cînd sarcina variază. În acest scop se reglează curentul de excitație. Curba $i = f(I)$ care arată modul cum trebuie variat curentul de excitație în funcție de curentul de sarcină I, pentru a se menține tensiunea la borne U constantă, se numește caracteristica reglajului.

În figura 3.20 este reprezentată caracteristica de reglaj la un generator cu excitația separată.

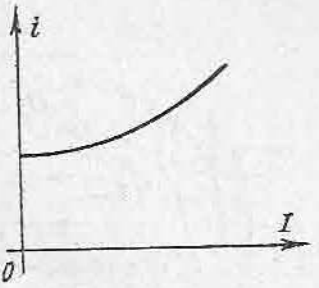


Fig. 3.20. Caracteristica reglajului generatorului cu excitație separată.

J. MOTOARE DE CURENT CONTINUU

1. SISTEME DE EXCITAȚIE ALE MOTOARELOR DE CURENT CONTINUU

Motoarele de curent continuu au aceleași sisteme de excitație ca și generatoarele de curent continuu (fig. 3.21):

— excitație separată;
— excitație derivație;
— excitație serie;
— excitație mixtă.

La motoare, în afara reostatului de excitație r_e, există un reostat R_p, montat în circuitul principal care este folosit în special la pornirea motorului (face excepție motorul cu excitație separată, care de obicei nu are reostat fiind pornit cu mijloace speciale.)

Între curentul de sarcină I, curentul în indus I_a și curentul excitației derivație i există relațiile:

— pentru motorul cu excitație separată și serie:

$$I = I_a;$$

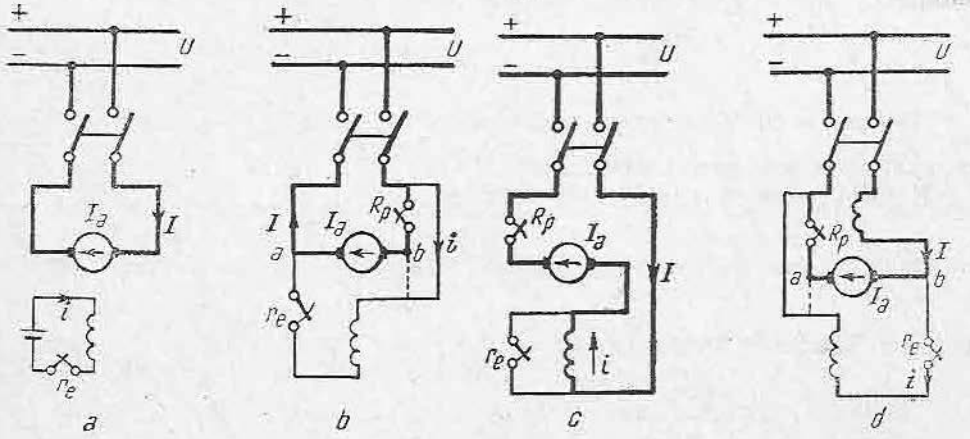


Fig. 3.21. Schemele motoarelor de curent continuu:
a — cu excitație separată; *b* — cu excitație derivație; *c* — cu excitație serie; *d* — cu excitație mixtă.

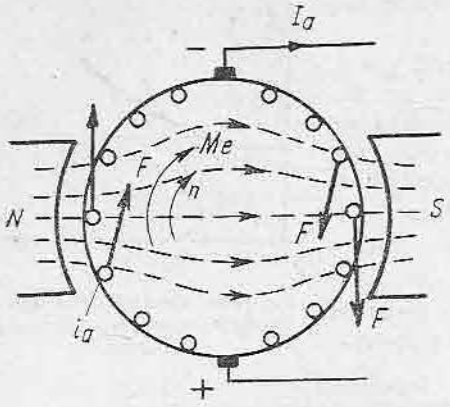


Fig. 3.22. Producerea cuplului la motorul de curent continuu.

— pentru motorul cu excitație derivație sau mixtă:

$$I = I_a + i.$$

2. CUPLUL MOTOARELOR DE CURENT CONTINUU

Aplicîndu-se tensiunea U la bornele unui motor de curent continuu prin înfășurarea indusului va circula curentul I_a (fig. 3.22).

Prin interacțiunea dintre cîmpul inductor și curentul din indus, iau naștere forțele electromagnetice F, tangente la indus, care produc asupra indusului un cuplu M_e, denumit cuplu electromagnetic. Acest cuplu pune în mișcare rotorul în sensul săgeții și, prin rotirea indusului se induce în înfășurarea rotorului o t.e.m. E, al cărei sens, după regula mîinii drepte, este invers decît sensul curentului ce circulă prin înfășurare, deci invers ca la generator. Din această cauză relația (3.6) devine în cazul motorului:

$$U = E + \Delta U \tag{3.14}$$

sau, pentru motorul cu excitație separată:

$$U = E + R_a I_a. \tag{3.15}$$

Motorul absoarbe de la rețea puterea $P_a = UI$. Scăzînd din aceasta pierderile în cupru în bobinajele de excitație p_e și pierderile în cupru în bobinajul indusului $p_{Cu} = R_a I_a^2$, rezultă puterea electromagnetică:

$$P_e = P_a - p_e - p_{Cu} = EI_a.$$

Notîndu-se cu Ω viteza unghiulară a indusului: $\Omega = \frac{2\pi n}{60}$ puterea electromagnetică se mai poate scrie: $P_e = M_e \Omega$.

Rezultă valoarea cuplului electromagnetic:

$$M_e = \frac{P_e}{\Omega},$$

în care făcîndu-se înlocuirile $P_e = EI_a$, $E = \frac{p}{a}\frac{N}{60} n\Phi$ și $\Omega = \frac{2\pi n}{60}$, rezultă

$$M_e = \frac{\frac{p}{a}\frac{N}{60} n\Phi I_a}{\frac{2\pi n}{60}} = \frac{p}{a}\frac{N}{2\pi}\Phi I_a. \tag{3.16}$$

Notîndu-se cu $K_m = \frac{pN}{a2\pi}$ rezultă:

$$M_e = K_m \Phi I_a, \tag{3.17}$$

adică cuplul electromagnetic este proporțional cu fluxul și curentul din indus.

3. PIERDERILE ȘI RANDAMENTUL MOTORULUI DE CURENT CONTINUU

Dacă din puterea electromagnetică se scad pierderile în fier produse în pachetul de tole al indusului și pierderile mecanice, se găsește puterea utilă:

$$P = P_e - p_m - p_{Fe}.$$

Această putere se poate scrie și sub forma:

$$P = M\Omega,$$

în care M este cuplul util la arborele mașinii. Este evident că $M < M_e$, însă neglijîndu-se pierderile mecanice și în fier se poate scrie $M \cong M_e$.

Notînd cu Σp suma pierderilor, rezultă că randamentul motorului de curent continuu va fi:

$$\eta = \frac{P}{P_a} = \frac{P_a - \Sigma p}{P_a} = \frac{UI - \Sigma p}{UI}. \tag{3.18}$$

4. CARACTERISTICA MECANICĂ A MOTOARELOR DE CURENT CONTINUU

La motoare interesează să se cunoască modul cum variază turația n a motorului cînd variază cuplul de sarcină M, adică curba $n = f(M)$, cînd ceilalți parametri (tensiunea aplicată U_e și rezistența circuitului de excitație) sînt constante.

Înlocuindu-se în relația (3.15) valoarea lui E, rezultă:

$$U = E + R_a I_a = K_e n \Phi + R_a I_a$$

de unde:

$$n = \frac{U - R_a I_a}{K_e \Phi} = \frac{U}{K_e \Phi} - \frac{R_a}{K_e \Phi} I_a. \tag{3.19}$$

Înlocuind în această relație valoarea I_a din relația (3.17) și făcînd aproximația $M \cong M_e$, rezultă expresia turației n funcție de cuplul M.

● **Pentru motorul cu excitație separată sau derivație** această expresie este:

$$n = \frac{U}{K_e \Phi} - \frac{R_a}{K_e K_m \Phi^2} M = K_1 - K_2 M. \tag{3.20}$$

Această relație arată că n variază liniar cu cuplul. La mersul în gol,

$$n_0 = K_1 = \frac{U}{K_e \Phi}, \tag{3.20'}$$

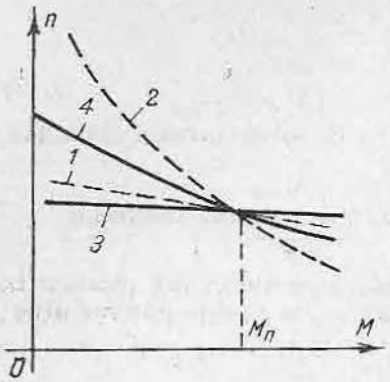


Fig. 3.23. Caracteristicile mecanice ale motoarelor de curent continuu cu excitație:
1—derivație; *2*—serie; *3* și *4*—mixtă.

iar pe măsură ce crește cuplul, n scade (caracteristica *1* din figura 3.23).

● **Pentru motorul cu excitație serie,** făcîndu-se abstracție de saturația magnetică, se poate considera că fluxul este proporțional cu curentul I_a, adică $\Phi = K_\varphi I_a$.

Expresia cuplului devine:

$$M = K_m I_a \Phi = K_m K_\varphi I_a^2,$$

adică cuplul este proporțional cu pătratul curentului, iar expresia turației devine:

$$n = \frac{U\sqrt{K_m K_\varphi}}{K_e K_\varphi \sqrt{M}} - \frac{R_a}{K_e K_\varphi} = \frac{K'}{\sqrt{M}} - K''. \qquad (3.21)$$

Conform acestei relații, caracteristica mecanică a motorului cu excitație serie are aspectul unei hiperbole (curba *2* din figura 3.23).

La mersul în gol, n_0 tinde spre infinit și din această cauză motorul cu excitație serie nu poate funcționa în gol sau cu sarcini foarte reduse, deoarece rotorul ar fi distrus de forțele centrifuge.

● **La motorul cu excitație mixtă diferențială,** excitația serie dezexcită mașina pe măsură ce sarcina crește și din această cauză turația nu mai scade ca la excitația derivație, ci rămîne practic constantă (curba *3* din figura 3.23).

● **La motorul cu excitație mixtă adițională,** excitația serie provoacă o cădere mai mare a turației pe măsură ce sarcina crește, obținîndu-se o situație intermediară între cazul excitației derivație și cea serie (curba *4* din figura 3.23).

5. PORNIREA MOTOARELOR DE CURENT CONTINUU

La motoarele de curent continuu, curentul I_a în indus nu trebuie să depășească de 2—2,5 ori curentul nominal, nici chiar un timp scurt, deoarece — în caz contrar — comutația s-ar înrăutăți foarte mult.

La pornire, cînd $n = 0$, $E = 0$, iar din relația (3.15) rezultă curentul de pornire.

$$I_p = \frac{U}{R_a}. \qquad (3.22)$$

Acest curent depășește de 20—50 de ori curentul nominal, deci nu este admisibil pentru motor și nici rețeaua care alimentează motorul.

Reducerea curentului de pornire se poate face:

● **Prin reducerea tensiunii aplicate U.** Această metodă se poate aplica numai dacă tensiunea U poate fi reglată după voie, cu o instalație specială. Deoarece fluxul trebuie să fie constant și cît mai mare, pentru a nu schimba valoarea fluxului odată cu variația tensiunii aplicate, motorul trebuie să aibă excitație separată.

● **Prin introducerea în circuitul principal al motorului a reostatului de pornire** R_p.

Curentul de pornire devine, prin alegerea convenabilă a lui R_p:

$$I_p = \frac{U}{R_a + R_p} = (2 - 2{,}5)\, I_n. \tag{3.23}$$

Această metodă se aplică la motoarele alimentate de la rețele cu tensiune constantă. Pe măsură ce turația motorului crește, crește și tensiunea electromotoare E, curentul absorbit de motor scade; reostatul poate fi treptat scos din circuit astfel ca, la sfîrșitul pornirii, el să fie scurtcircuitat

6. REGLAREA VITEZEI LA MOTOARELE DE CURENT CONTINUU

Conform relației (3.19), viteza de rotație a motorului are expresia:

$$n = \frac{U - R_a I_a}{K_e \Phi}.$$

Neglijîndu-se căderea de tensiune, se poate scrie:

$$n \simeq \frac{U}{K_e \Phi}. \tag{3.24}$$

Conform acestei relații, viteza de rotație poate fi reglată fie prin variația tensiunii aplicate U, fie prin variația fluxului.

● **Reglarea prin variația tensiunii U.** Dacă fluxul este constant, viteza variază proporțional cu tensiunea aplicată.

Acest mijloc se poate aplica numai la motorul practic cu excitație separată, la care alimentarea motorului se poate face de la o sursă cu tensiunea variabilă, obținîndu-se un reglaj foarte larg al turației, de la valori relativ mici la turația nominală.

Variația tensiunii U se poate obține și prin montarea în circuitul principal a unui reostat suplimentar, însă metoda nu este economică, producîndu-se pierderi importante în reostat și obținîndu-se un reglaj mic al turației, de 15—20% sub turația nominală.

● **Reglarea prin variația fluxului** Φ se face cu ajutorul reostatului de excitație. Viteza variază invers proporțional cu fluxul, deci cu curentul de excitație. Prin această metodă se obține nu reglaj al turației de la valoarea nominală în sus pînă la 2—3 ori turația nominală.

7. SCHIMBAREA SENSULUI DE ROTAȚIE

Din expresia:

$$M = K_m \Phi I_a$$

rezultă că sensul cuplului produs, deci sensul rotației, poate fi schimbat fie prin inversarea sensului fluxului Φ, fie prin inversarea sensului curentului I_a.

În acest scop trebuie să se inverseze legăturile, fie la excitație, fie la indus. Dacă se inversează ambele legături simultan, sensul de rotație nu se inversează.

8. FRÎNAREA MOTOARELOR DE CURENT CONTINUU

La acționarea electrică a unor mecanisme, apare necesitatea frînării mecanismului, fie pentru micșorarea vitezei, fie pentru menținerea constantă a vitezei mecanismului care este sub acțiunea unui cuplu exterior.

Principalele metode de frînare sînt:

● **Frînarea prin recuperare.** Această metodă se utilizează atunci cînd motorul este antrenat de către mecanismul acționat, la o turație ce depășește turația în gol n_0 a motorului. O astfel de situație apare de exemplu la un vehicul acționat electric (locomotivă electrică, tramvai etc.) care coboară o pantă. Cînd vehiculul este acționat de motor, acesta este alimentat de la rețea cu tensiunea U, curentul intră prin peria pozitivă a motorului. Cînd începe coborîrea pantei, gravitatea acționează asupra vehiculului, iar cuplul motor și curentul I_a scad la zero, mașina de curent continuu mergînd în gol. Crescînd viteza de rotație peste n_0, t.e.m. E depășește ca valoare pe U, apare un curent I_a invers decît în situația anterioară (iese din peria pozitivă) și mașina funcționează ca generator, transformînd energia cinetică a vehiculului în energie electrică pe care o înapoiază rețelei, realizînd o recuperare a energiei. Frînarea prin recuperare este cea mai economică metodă, însă poate fi utilizată numai la turații mari și deci cu ea nu se poate realiza oprirea motorului.

● **Frînarea dinamică (reostatică)** se obține decuplînd motorul de la rețea și legînd la bornele sale un reostat. Mașina funcționează ca generator, care transformă energia primită de la mecanism, în energie electrică debitată în reostat. Efectul de frînare se micșorează pe măsura descreșterii turației, așa încît nici cu această metodă nu se poate obține decît frînarea pînă la turații mici.

Metoda este larg utilizată în practică, de exemplu la vehicule acționate electric.

● **Frînarea prin contracurent** constă în inversarea conexiunilor la bornele motorului alimentat de la rețea. La această metodă, energia cinetică a mecanismului și energia primită de la rețea se transformă în căldură în motor, obținîndu-se o frînare puternică, sensul de rotație putîndu-se inversa, dacă mașina nu este deconectată la timp de la rețea.

K. EXPLOATAREA ȘI DEFECTELE MAȘINILOR DE CURENT CONTINUU

1. EXPLOATAREA MAȘINILOR ELECTRICE

La exploatarea mașinilor electrice trebuie avut în vedere corecta instalare, protecție, utilizare și întreținere a mașinii.

● **Instalarea.** Pentru instalarea corectă a mașinii trebuie să se îndeplinească următoarele condiții principale:

— fixarea pe fundație să fie suficient de rezistentă pentru a rezista cuplurilor maxime, iar poziția să fie perfect orizontală sau verticală (după tipul

constructiv al mașinii) pentru a se evita eforturi suplimentare în lagăre;
— cuplarea mașinilor cu mecanismul acționat să se facă corect; la cuplarea coaxială se verifică coaxialitatea arborilor, la cuplarea cu curele se verifică întinderea acestora, la cuplarea cu roți dințate se reglează precis distanța între axe, în scopul de a evita vibrațiile și producerea unor uzuri și încălziri anormale în lagăre;
— se verifică dacă mașina nu a suferit stricăciuni în timpul transportului sau montajului;
— se verifică dacă rezistența de izolație nu a scăzut prin umezirea bobinajelor;
— se execută corect legăturile la placa de borne a mașinii și legarea la pămînt a carcasei.

● **Protecția.** În schema electrică a acționării trebuie să se prevadă aparate de protecție pentru a realiza:
— protecția contra scurtcircuitelor, cu siguranțe fuzibile sau relee electromagnetice;
— protecția contra suprasarcinilor cu relee electromagnetice temporizate sau relee termice;
— protecția de tensiune nulă, care decuplează motoarele de la rețea, atunci cînd tensiunea scade sub o anumită limită și care se realizează cu relee de tensiune minimă.

● **Utilizarea.** Mașina electrică trebuie să funcționeze într-un regim, care să nu depășească caracteristicile pentru care mașina a fost construită. Depășirea acestui regim poate scurta foarte mult durata de serviciu a mașinilor. În principal nu trebuie depășită puterea nominală, durata ciclului și durata activă la regim intermitent. Tensiunea de alimentare nu trebuie să difere cu mai mult de $\pm 5\%$ față de tensiunea nominală.

● **Întreținerea.** Pentru a asigura o exploatare normală și o durată de serviciu îndelungată, mașinile sînt supuse periodic unor verificări, revizii și reparații planificate. Aceste lucrări au ca scop în primul rînd înlocuirea pieselor ce se uzează normal, cum sînt periile, vaselina rulmenților, uleiul lagărelor de alunecare, îndepărtarea prafului depus și în al doilea rînd remedierea la timp a unor defecte mărunte ce pot provoca stricăciuni mai mari, dacă nu ar fi înlăturate la timp.

2. DEFECTELE MAȘINILOR DE CURENT CONTINUU ȘI REMEDIEREA LOR

Defectele mai importante ce pot apărea la mașinile de curent continuu sînt:

● **Înrăutățirea comutației,** prin apariția unor scîntei puternice sau chiar „cerc de foc la colector". Defectul se poate datora următoarelor cauze:
— *Deformarea colectorului.* Prin uzare, colectorul se poate ovaliza sau se poate slăbi strîngerea lamelelor de colector. În acest caz mașina se demontează și se repară colectorul.
— *Starea necorespunzătoare a suprafeței colectorului* sau *periile neșlefuite.* Pentru remediere se șlefuiește suprafața colectorului, se frezează micanita dintre lamele și se șlefuiesc periile.

— *Deplasarea periilor din axa neutră.* Se verifică poziția periilor și se fixează bine crucea portperii, pentru a nu se deplasa.

— *Presiune diferită pe perii.* Se reglează resoartele portperii pentru a se realiza o presiune aproximativ egală la toate periile.

— *Scurtcircuit în bobinajul indusului.*

● **Defectarea bobinajului indusului** provocată de:

— *Scurtcircuit între spire,* din cauza străpungerii izolației între spire sau între două lamele de colector. Are ca efect încălzirea puternică a spirelor scurtcircuitate și înrăutățirea comutației, iar la generator, tensiunea la borne este insuficientă. Pentru remediere se demonstrează mașina și se rebobinează parțial sau total indusul.

— *Întrerupere în înfășurarea indusului.* Motorul nu pornește, iar generatorul nu dă tensiune. Remedierea necesită rebobinarea parțială sau totală a indusului.

— *Străpungerea izolației față de masă.* Dacă străpungerea s-a produs într-un singur loc, mașina funcționează normal, însă este periculos pentru personalul de serviciu. De aceea la verificările periodice se controlează rezistența de izolație față de masă.

● **Defectarea bobinelor polare** provocată de:

— *Întreruperea în circuitul bobinelor de excitație.* Generatorul nu dă tensiune, iar motorul nu pornește.

— *Întreruperea sau scurtcircuitul în bobinele polilor auxiliari* are ca efect înrăutățirea comutației. Mașina trebuie demontată și remediată bobina sau legătura defectă.

— *Scurtcircuit între spire la bobinele de excitație.* Generatorul nu mai dă tensiune suficientă, iar motorul funcționează cu o viteză mai mare. Defectul nu e însoțit de încălzirea spirelor scurtcircuitate, deoarece fluxul în stator este constant, însă defectul se poate amplifica și de aceea bobina defectă trebuie înlocuită.

● **Defecte mecanice.** Acestea se manifestă prin zgomot și vibrații puternice și sînt cauzate în principal de uzura lagărelor sau slăbirea și dezechilibrarea cuplajelor. Pentru remediere se înlocuiesc lagărele și se echilibrează partea rotativă a mașinii și cuplajul.

L. MAȘINI SPECIALE DE CURENT CONTINUU

În afară de construcțiile relativ normale, în practică se utilizează o serie de mașini speciale de curent continuu, a căror construcție și principiu de funcționare diferă de cele ale mașinilor normale.

● **Amplidina** este o mașină de curent continuu cu cîmp transversal care este utilizată ca amplificator de putere, debitînd o putere amplificată de 300—500 ori, însă proporțională cu semnalul primit.

Mașina are atît rotorul cît și statorul executate din tole (fig. 3.24). Pe stator sînt așezate: înfășurarea de excitație pentru doi poli (înfășurarea care primește semnalul) înfășurarea de comutație și înfășurarea de compensație. Pe colector sînt prevăzute patru rînduri de perii, periile T_1 și T_2, situate pe axa neutră și scurtcircuitate între ele și periile L_1, L_2 situate pe axa polilor

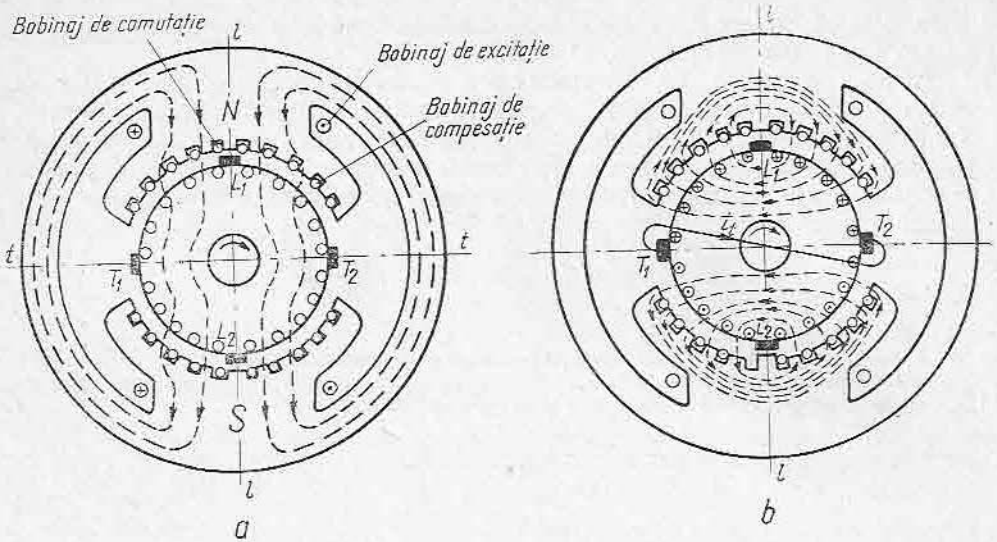


Fig. 3.24. Schema electrică a amplidinei:
a — cîmpul magnetic inductor; *b* — cîmpul magnetic transversal.

de excitație. Dacă se alimentează înfășurarea de excitație cu semnalul i_e, se creează un flux inductor slab pe axa longitudinală $l—l'$ (fig. 3.24, *a*). Acesta induce în bobinajul indusului o t.e.m. care produce curentul i_t de valoare mai mare, care se închide prin periile T_1, T_2. Curentul i_t care circulă prin bobinajul indusului produce la rîndul său un flux de reacție transversal, orientat după axa $t—t'$, care induce în bobinajul indusului o t.e.m. E ce poate fi măsurată la periile L_1, L_2. Prin periile L_1, L_2, amplidina debitează în circuitul exterior o putere amplificată față de puterea primită în bobinajul de excitație.

Pentru îmbunătățirea comutației periilor L_1, L_2, pe stator este prevăzut un bobinaj de comutație, iar pentru compensarea fluxului de reacție ce îl produce curentul principal se prevede un bobinaj de compensație, repartizat uniform în crestături.

● **Metadina** este o mașină de curent continuu cu cîmp transversal care în regim normal de funcționare transformă o putere primită de la o rețea cu U_1 constant, într-o putere la altă valoare a tensiunii U_2 și I_2 constant.

Schema de principiu este indicată în figura 3.25.

Mașina are tot patru perii, două pe axa transversală T_1, T_2 și două pe axa longitudinală. Alimentînd periile transversale cu curentul I_1

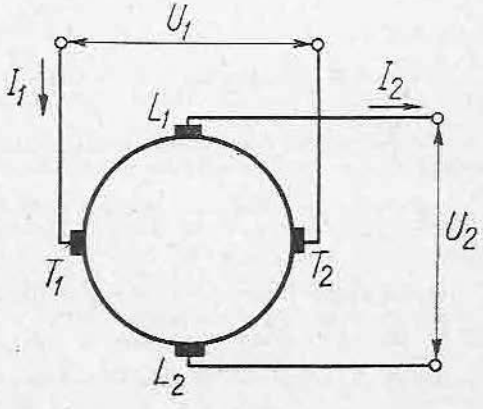


Fig. 3.25. Schema electrică a metadinei.

de la o rețea cu tensiune constantă, mașina va debita o putere la periile L_1, L_2 caracterizată prin I_2 constant.

În R. S. România se execută mașini de curent continuu, generatoare și motoare pentru diferite utilizări, cum sînt: motoare de curent continuu pentru tracțiune (locomotive Diesel-electrice și Diesel-hidraulice, locomotive de mină, tramvaie, troleibuze), motoare de curent continuu pentru mașini-unelte, pentru nave, generatoare de curent continuu de uz general, generatoare pentru sudare cu arc electric etc.

PROBLEME

1. Un generator cu excitație separată, cu tensiunea nominală $U_n = 230$ V, funcționează în gol cu tensiunea nominală la borne. Rezistența bobinajului: $R_a = 0{,}1\ \Omega$. Caracteristica de mers în gol a generatorului este dată în următoarea tabelă:

i[A]	1,6	2,4	3,2	4	4,8	5,6
$U_0 = E_0$[V]	102	154	198	230	258	273

Să se determine la cît trebuie mărit curentul de excitație pentru ca, la un curent de sarcină $I = 100$ A, tensiunea la borne să fie egală cu tensiunea nominală.

Soluție. La mersul în gol, generatorul are tensiunea electromotoare $E_0 = U_n = 230$ V obținută cu un curent de excitație $i_0 = 4$A. La mersul în sarcină, el trebuie să producă tensiunea electromotoare $E = U + R_a I = U_n + R_a I = 230 + 0{,}1 \cdot 100 = 240$ V. Pe caracteristica de mers în gol, la tensiunea electromotoare $E = 240$ V corespunde curentul de excitație $i = 4{,}25$A.

2. Un generator de curent continuu cu excitație derivație debitează în rețea puterea $P = 11$ kW, la tensiunea $U = 220$ V. Bobinajul de excitație are rezistența $r_e = 100\ \Omega$, iar indusul are rezistența $R_a = 0{,}2\ \Omega$. Să se determine: curentul de sarcină I; curentul de excitație i; tensiunea electromotoare a generatorului.

Soluție. Din expresia puterii $P = UI$ se deduce curentul de sarcină $I = \frac{P}{U} = \frac{11\,000}{220} = 50$ A. Curentul de excitație $i = \frac{U}{r_e} = \frac{220}{100} = 2{,}2$ A. Curentul indus $I_a = I + i = 50 + 2{,}2 = 52{,}2$ A. Valoarea exactă a tensiunii electromotoare induse este $E = U + R_a(I + i) = U + R_a I_a = 220 + 0{,}2 \cdot 52{,}2 = 230{,}44$ V.

3. Să se rezolve problema din aplicația 2 în ipoteza că generatorul considerat are excitație serie. Înfășurarea de excitație are rezistența $r_e = 0{,}15\ \Omega$.

Soluție. Ca în aplicația 2 se obține $I = 50$ A. Curentul de excitație $i = I = 50$ A. Curentul în indus $I_a = I = 50$ A. Valoarea exactă a tensiunii electromotoare este $E = U + (R_a + R_s) I = 220 + (0{,}2 + 0{,}15)\ 50 = 237{,}5$ V.

4. Un motor de curent continuu cu excitație separată, de tensiune $U = 220$ V cu rezistența bobinajului rotoric $R_a = 0{,}2\ \Omega$ are curentul nominal de sarcină $I_n = 50$ A și turația nominală $n_n = 1\,000$ rot/min. Care este turația de mers în gol a acestui motor?

Soluție. Din relația (3.19), valabilă pentru $n = n_n = 1\,000$ rot/min, $U = 220$ V, $R_a = 0{,}2\ \Omega$ și $I_a = I_{an} = I_n = 50$ A se obține $k_e \Phi = \frac{U - R_a I_{an}}{n_n} = \frac{220 - 0{,}2 \cdot 50}{1000} = 0{,}21$. Fluxul fiind

independent de sarcină, din relația (3.20) rezultă turația de mers în gol $n_0 = \frac{U}{k_e \Phi} = \frac{220}{0{,}21} =$

$= 1048$ rot/min.

5. Un motor de curent continuu cu excitație serie, pentru tensiunea $U = 220$ V, are curentul nominal $I_n = 50$ A și rezistența bobinajului indus $R_a = 0{,}15\Omega$. Ce rezistență maximă trebuie să aibă reostatul de pornire a motorului, dacă curentul de pornire trebuie să nu depășească valoarea $I_p = 2I_n$.

Soluție. Din relația (3.23) se deduce:

$$R_p = \frac{U}{I_p} - R_a = \frac{220}{2 \cdot 50} - 0{,}15 = 2{,}05\ \Omega.$$

6. Un generator de curent continuu avînd $U = 220$ V și $I = 10$ A, absoarbe puterea de 2,5 kW. Să se calculeze puterea utilă și randamentul.

Răspuns: $P_u = 2{,}2$ kW; $\eta = 0{,}88$.

7. Un motor de curent continuu are puterea nominală, de 9 kW, tensiunea nominală de 110 V, și curentul nominal de 100 A. Să se calculeze puterea absorbită și randamentul.

Răspuns: $P_a = 11$ kW; $\eta = 0{,}81$.

REZUMAT

1. Tipuri de mașini electrice:

După transformarea energiei:

— motoare: energie electrică → mecanică;
— generatoare: energie mecanică → electrică;
— convertizoare: energie electrică → electrică;
— frînă: energie electrică + mecanică → căldură.

După principiul de funcționare:

— mașini de curent continuu
— mașini de curent alternativ { — sincrone; — asincrone; — cu colector

2. Serviciul mașinilor electrice:

S_1 — continuu;
S_2 — scurtă durată;
S_3 — intermitent periodic;
S_6 — neîntrerupt cu sarcină intermitentă periodică.

3. Elemente constructive de bază la mașina de curent continuu:

Statorul { — carcasa; — poli de excitație; — bobine de excitație; — poli auxiliari; — bobine de comutație

- **Rotorul**
  - arbore
  - pachet role
  - suporți de bobinaj
  - colectorul
  - bobinajul indus
  - ventilator
- **Crucea portperii**
- **Scuturi și lagăre**
- **Cutia de borne**

4. Înfășurările de curent continuu:

- **Buclat**
  - simplu: $2a = 2p$
  - multiplu: $2a = q2p$
- **Ondulat**
  - serie: $2a = 2$, indiferent de $2p$
  - serie paralel: $2 < 2a < 2p$
  - paralel simplu: $2a = 2p$
  - paralel multiplu: $2a > 2p$

5. Tensiunea electromotoare indusă:

$$E = \frac{N}{2a} B_m l v = \frac{p}{a} N \frac{n}{60} \Phi = K_e n \Phi$$

în care:

$B_m = \frac{\Phi}{\tau l}$ — inducția medie în întrefier;

$\tau = \frac{\pi D}{2p}$ — pasul polar;

l — lungimea pachetului de tole;

$v = \frac{\pi D n}{60}$ — viteza periferică.

6. Reacția indusului:

- deformează cîmpul magnetic inductor;
- decalează axa neutră;
- micșorează fluxul inductor.

7. Îmbunătățirea comutației:

- utilizarea de perii care nu formează scîntei
- inducere în spirele care comută, a lui $e_c = e_s$
  - prin decalarea periilor
    - la generator în sensul rotației
    - la motor în sens invers rotației.
  - prin poli auxiliari

8. Sisteme de excitație la generatoare și motoare de curent continuu:
— separată;
— derivație;
— serie;
— mixtă { — adițional; — diferențial

9. Căderi de tensiune, puteri, randament

Excitație, puteri, randament	Generator	Motor
Separată	$U = E - R_a I$	$U = E + R_a I$
Derivație	$U = E - R_a(I + i)$	$U = E + R_a(I - i)$
Serie	$U = E - (R_a + R_p) I$	$U = E + (R_a + R_p) I$
Mixtă	$U = E - R_a(I + i) - R_s I$	$U = E + R_a(I - i) + R_s I$
Indiferent	$U = E - \Delta U$	$U = E + \Delta U$
Putere utilă	electrică $P = UI$	mecanică $P = UI + \Sigma p$
Putere absorbită	mecanică $P_a = UI - \Sigma p$	electrică $P = UI$
Randament	$\eta = \frac{P}{P_a}$	

10. Cuplul și caracteristica mecanică a motoarelor de curent continuu.

— **Cuplul electromagnetic:**

$$M_e = K_m \Phi I_a.$$

— **Caracteristica mecanică:**

$$n = \frac{U}{K_e \Phi} - \frac{R_a}{K_e K_m \Phi^2} M \begin{cases} - \text{ la excitație separată: } n = K_1 - K_2 M \\ - \text{ la excitație serie: } n = \frac{K'}{\sqrt{M}} - K'' \end{cases}$$

11. Reglarea tensiunii la generatoare:

$$U = E - \Delta U = K_e n \Phi - \Delta U \cong K_e n \Phi$$

U este proporțional cu n și cu Φ, deci cu i_e.

12. Pornirea motoarelor de curent continuu:

$$I_p = \frac{U}{R_a + R_p}.$$

13. Reglarea turației motorului de curent continuu:

— de la n_n în jos — n este proporțional cu U;
— de la n_n în sus — n este invers proporțional cu Φ, deci cu i_e.

14. Schimbarea sensului de rotație:

$$M = K_m \Phi I_a$$

Schimbarea sensului { — inversarea fluxului Φ, deci a lui i_e ; — inversarea curentului în indus I_a

15. Metode de frînare a motoarelor de curent continuu:

— prin recuperare;
— dinamică (reostatică);
— prin contracurent.

Capitolul 4

TRANSFORMATOARE ELECTRICE

A. CONSTRUCȚIA ȘI UTILIZAREA TRANSFORMATORULUI

1. NOȚIUNI GENERALE

Transformatorul este un *aparat static* care modifică pe *cale electromagnetică* parametrii unui circuit de *curent* alternativ (tensiunea și *curentul*).

Trebuie subliniat că transformatorul poate modifica (transforma) numai caracteristicile curentului alternativ și că transformarea se face la aceeași frecvență.

În principal transformatorul este constituit dintr-un miez magnetic, pe care sînt așezate două înfășurări, izolate între ele, *înfășurarea primară*, care primește energia electrică, și *înfășurarea secundară*, care cedează energia electrică unei rețele sau unui consumator. Înfășurarea care corespunde cu tensiunea cea mai mare se numește *înfășurare de înaltă tensiune* (IT), iar înfășurarea corespunzătoare tensiunii mai mici se numește *înfășurare de joasă tensiune* (JT).

2. UTILIZAREA ȘI CLASIFICAREA TRANSFORMATOARELOR

Transformatoarele sînt de o largă utilizare în practică, îndeosebi în domeniul transportului și distribuției energiei electrice.

● **După domeniul de utilizare,** transformatoarele electrice se pot clasifica în:

— *transformatoare de putere,* pentru transportul și distribuția energiei electrice;

— *autotransformatoare;*

— *transformatoare de măsură,* pentru conectarea indirectă a aparatelor de măsură a tensiunilor și curenților mari;

— *transformatoare de putere cu caracteristici speciale,* cum sînt cele pentru alimentarea cuptoarelor electrice, pentru alimentarea redresoarelor cu vapori de mercur, pentru sudare electrică, pentru încercări etc.;

— *transformatoare de putere mică,* cum sînt transformatoarele de siguranță, transformatoarele de izolare, de separare etc.;

● **După numărul de faze,** transformatoarele pot fi *monofazate* sau *polifazate,* între acestea, transformatoarele trifazate fiind cele mai utilizate.

● **Din punctul de vedere al modului de răcire,** transformatoarele pot fi *uscate* (*cu răcire în aer*) sau *cu răcire în ulei* (care sînt cele mai utilizate).

3. ELEMENTE CONSTRUCTIVE DE BAZĂ

Tipul cel mai utilizat de transformator și anume transformatorul trifazat în ulei este constituit din următoarele părți principale: miezul magnetic, schela, înfășurările, capacul cu izolatoarele de trecere și cuva de ulei (fig. 4.1).

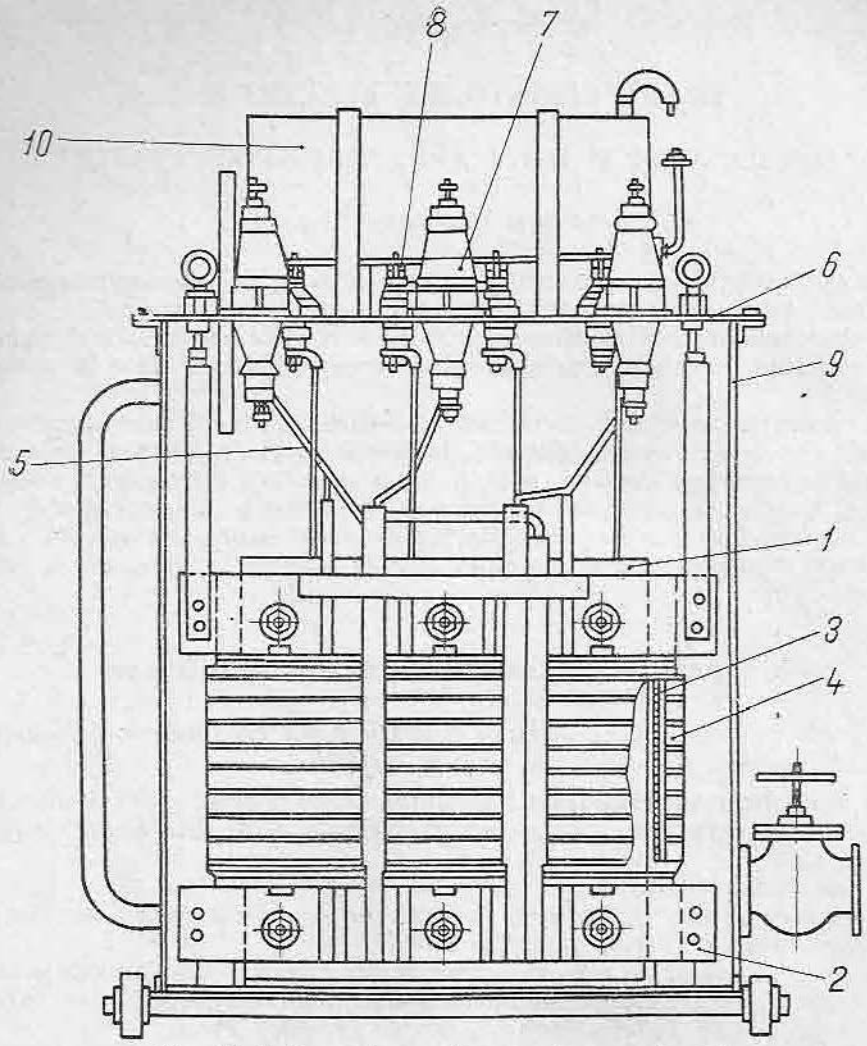


Fig. 4.1. Secțiune prin transformatorul răcit în ulei:
1 — miez magnetic; *2* — grinzile schelei; *3* — înfășurarea de joasă tensiune; *4* — înfășurarea de înaltă tensiune; *5* — conexiuni; *6* — capac; *7* — izolatoare de înaltă tensiune; *8* — izolatoare de joasă tensiune; *9* — cuva; *10* — conservatorul de ulei.

● **Miezurile magnetice** se execută din tole confecționate din tablă silicioasă specială pentru transformatoare și sînt de două tipuri: în manta (fig. 4.2) și cu coloane (fig. 4.3).

Cu linie întreruptă sînt indicate locurile unde se montează înfășurările.

● **Înfășurările.** Se realizează din bobine în general de formă cilindrică, unele de joasă tensiune și altele de înaltă tensiune. Bobinele și miezul sînt strînse cu ajutorul **schelei.**

● **Cuva.** La transformatoarele cu răcire în ulei, miezul cu înfășurările sînt introduse într-o cuvă din tablă de oțel, care se umple cu ulei. Uleiul are

un triplu rol de izolant, agent de răcire și de a proteja înfășurările de umiditate.

● **Modurile de răcire.** Transformatoarele uscate se răcesc prin circulația naturală a aerului pe lîngă miez și înfășurări sau cu ventilație forțată cu ajutorul unui ventilator.

La transformatoarele în ulei căldura de la înfășurări și miez este transportată de ulei în dispozitivele de răcire ale cuvei (ondule, țevi, radiatoare) unde este cedată aerului înconjurător.

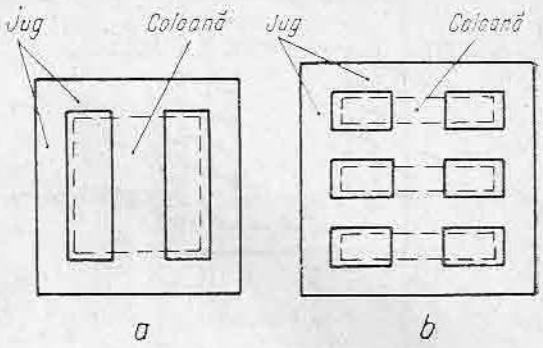


Fig. 4.2. Miezul magnetic în manta: *a* — monofazat; *b* — trifazat.

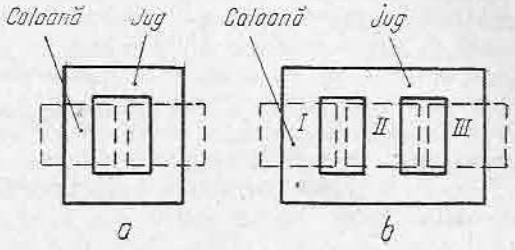


Fig. 4.3. Miezuri magnetice cu coloane: *a* — monofazat; *b* — trifazat.

● **Capacul, bornele și conservatorul.** Partea superioară a unei cuve este închisă etanș de un capac din tablă de oțel. Pe capac sînt montate bornele de trecere a legăturilor electrice din interiorul transformatorului, la exterior și un rezervor de tablă, numit conservator, care comunică printr-o conductă cu cuva. Conservatorul este parțial umplut cu ulei, astfel încît preia variațiile de nivel ale uleiului ce se produc la variația temperaturii lui.

B. TRANSFORMATOARE MONOFAZATE

1. PRINCIPIUL DE FUNCȚIONARE

Funcționarea transformatorului se bazează pe principiul inducției electromagnetice între două circuite fixe, așezate pe un miez magnetic comun. (fig. 4.4).

Pentru o descriere simplificată a funcționării transformatorului, se neglijează o serie de fenomene, care vor fi studiate în capitolele următoare, și anume: căderile de tensiune active, fluxurile de scăpări, pierderile în fier și în cupru etc.

Alimentînd înfășurarea primară *1* cu o tensiune alternativă u_1, prin ea va circula un curent alternativ. Dacă circuitul secundar *2* este deschis (nu are legat nici un receptor), curentul din înfășurarea primară are o valoare redusă și este numit *curent de mers în gol* i_0.

Curentul i_0 produce un flux magnetic alternativ φ care se închide prin circuitul magnetic *3*. Acest flux induce în înfășurarea primară o tensiune

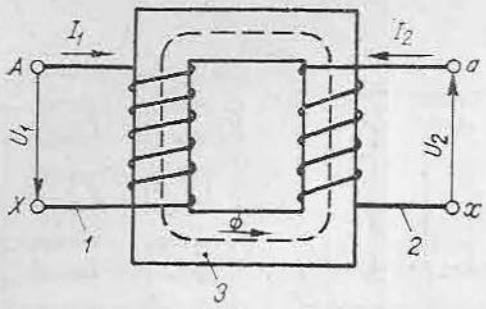


Fig. 4.4. Principiul de funcționare a transformatorului.

electromotoare e_1 și în înfășurarea secundară o tensiune electromotoare e_2.

Tensiunea electromotoare e_1 este de sens contrar cu tensiunea aplicată u_1 și, neglijînd căderile de tensiune, se poate spune că este egală în valoare absolută cu această tensiune.

Dacă se conectează la bornele înfășurării secundare un receptor, prin această înfășurare va circula curentul secundar i_2. Curentul i_2 produce un flux φ_2, care, conform legii lui Lenz, se opune cauzei care l-a produs, și deci se opune fluxului φ, tinzînd să-l micșoreze. Valoarea fluxului φ însă trebuie să se mențină constantă (neglijîndu-se căderile de tensiune și pierderile) pentru a se putea induce tensiunea electromotoare e_1 care trebuie să fie egală cu tensiunea aplicată u_1. De aceea înfășurarea primară va absorbi de la rețea un curent mai mare decît i_0, numit curent primar i_1, care produce fluxul φ_1. Prin compunerea fluxului φ_1 produs de curentul i_1 și a fluxului φ_2, produs de curentul i_2, în miezul transformatorului se menține fluxul φ.

Deci cînd transformatorul funcționează în sarcină, înfășurarea primară absoarbe de la rețea puterea $u_1 i_1$ și debitează prin înfășurarea secundară unui receptor puterea $u_2 i_2$. Neglijînd pierderile în transformator, se poate scrie $u_1 i_1 = u_2 i_2$.

2. ECUAȚIILE GENERALE DE FUNCȚIONARE

La funcționarea transformatorului apar, spre deosebire de cele arătate în cazul simplificat descris anterior, și alte fenomene cum sînt: fluxurile de scăpări, căderile de tensiune etc.

În figura 4.5 este arătată schema unui transformator monofazat, la secundarul căruia a fost conectat un receptor.

Înfășurarea primară, alimentată cu tensiunea alternativă sinusoidală u_1, absoarbe curentul i_1. Tensiunea la bornele înfășurării secundarului este u_2, iar receptorul absorabe curentul i_2.

Înfășurarea primară produce un flux magnetic φ_1 care se închide prin circuitul magnetic. În afară de acesta, o parte a liniilor de forță ale fluxului produs de înfășurarea primară se închide în jurul acestei înfășurări prin aer, formînd fluxul de scăpări φ_{s1}, care nu trece și prin spirele înfășurării secundare.

Înfășurarea secundară, străbătută de curentul i_2, produce și ea un flux φ_2 care se închide prin circuitul magnetic și un flux de scăpări φ_{s2} care se închide prin aer și nu trece prin spirele înfășurării primare.

Fluxurile φ_1 și φ_2 avînd un circuit magnetic comun se compun și dau fluxul rezultat φ numit și *flux principal* sau *util*.

Se notează cu:

N_1 și N_2 — numărul de spire în înfășurarea primară, respectiv secundară;

R_1 și R_2 — rezistența electrică a înfășurării primare, respectiv secundare;

L_1 și L_2 — inductanța de scăpări a înfășurării primare, respectiv secundare.

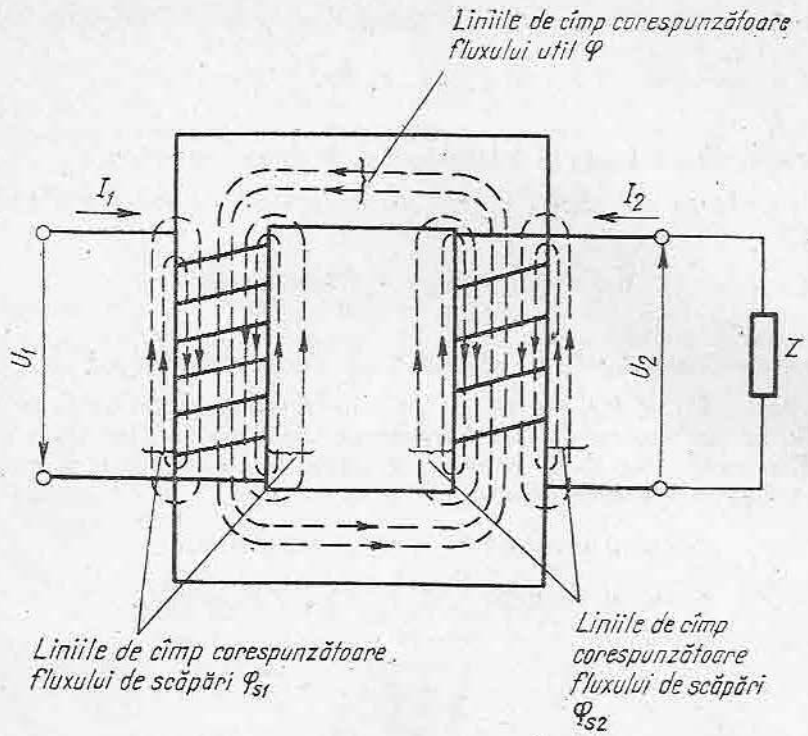


Fig. 4.5. Funcționarea transformatorului în sarcină.

Considerînd fluxul φ sinusoidal, și luînd ca origine de fază, faza fluxului φ, valoarea instantanee a acestuia este:

$$\varphi = \Phi \sin \omega t.$$

Conform legii inducției, t.e.m. e_1 este:

$$e_1 = -N_1 \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = N_1 \Phi \omega \cos \omega t = N_1 \Phi \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \tag{4.1}$$

și are valoarea eficace:

$$E_1 = \frac{N_1 \Phi \omega}{\sqrt{2}} = 4{,}44\, f N_1 \Phi \tag{4.2}$$

fiind defazată cu $\frac{\pi}{2}$ în urma fluxului.

La fel t.e.m. e_2 este:

$$e_2 = N_2 \Phi \omega \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right), \tag{4.3}$$

are valoarea eficace

$$E_2 = 4{,}44\, f N_2 \Phi \tag{4.4}$$

și este defazată cu $\frac{\pi}{2}$ în urma fluxului.

Fluxul de scăpări φ_{s1} induce în înfășurarea primară t.e.m. de scăpări:

$$e_{s1} = -L_1 \frac{\Delta i_1}{\Delta t}, \tag{4.5}$$

cu valoarea eficace $L_1\omega I_1$ și defazată cu $\frac{\pi}{2}$ în urma curentului i_1.

La fel, fluxul de scăpări φ_{s2} induce în înfășurarea secundară t.e.m. de scăpări:

$$e_{s2} = -L_2 \frac{\Delta i_2}{\Delta t} \tag{4.6}$$

cu valoarea eficace $L_2\omega I_2$ și defazată cu $\frac{\pi}{2}$ în urma curentului i_2.

Notînd cu $R_1 i_1$ și $R_2 i_2$ căderile de tensiune în primar respectiv în secundar, ecuațiile de funcționare ale transformatorului se obțin aplicînd legea a doua a lui Kirchhoff celor două circuite ale înfășurării din primar și secundar.

În valori instantanee rezultă:

$$\text{(circuitul primarului)} \quad u_1 + e_1 + e_{s1} = R_1 i_1; \tag{4.7}$$

$$\text{(circuitul secundarului)} \quad e_2 + e_{s2} - u_2 = R_2 i_2 \tag{4.8}$$

sau

$$u_1 = -e_1 + R_1 i_1 - e_{s1}; \tag{4.9}$$

$$u_2 = e_2 - R_2 i_2 + e_{s2}. \tag{4.10}$$

În complex, aceste ecuații se scriu:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + R_1 \underline{I}_1 - \underline{E}_{s1}; \tag{4.11}$$

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_2 - R_2 \underline{I}_2 + \underline{E}_{s2}. \tag{4.12}$$

Notînd cu X_1 reactanța de scăpări a înfășurării primare $X_1 = L_1\omega$ și cu X_2 reactanța de scăpări a înfășurării secundare $X_2 = L_2\omega$, t.e.m. $\underline{E}_{s1}$ și $\underline{E}_{s2}$ au expresiile:

$$\underline{E}_{s1} = -\mathrm{j}X_1 \underline{I}_1; \tag{4.13}$$

$$\underline{E}_{s2} = -\mathrm{j}X_2 \underline{I}_2, \tag{4.14}$$

în care fazorul $-\mathrm{j}$ arată că t.e.m. sînt defazate cu $\frac{\pi}{2}$ în urma curenților respectivi.

Ecuațiile de funcționare ale transformatorului devin:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + R_1 \underline{I}_1 + \mathrm{j}X_1 \underline{I}_1, \tag{4.15}$$

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_2 - R_2 \underline{I}_2 - \mathrm{j}X_2 \underline{I}_2. \tag{4.16}$$

Componentele $R_1 I_1$ și $R_2 I_2$ se numesc căderi de tensiune active, iar componentele $\mathrm{j}X_1 I_1$ și $\mathrm{j}X_2 I_2$ se numesc căderi de tensiune inductive (reactive).

3. FUNCȚIONAREA TRANSFORMATORULUI MONOFAZAT ÎN GOL

Transformatorul funcționează în gol, atunci cînd înfășurarea primară este legată la rețea, iar înfășurarea secundară este deschisă.

Înfășurarea primară absoarbe de la rețea curentul de mers în gol I_0, care are o valoare redusă, în raport cu valoarea de funcționare în sarcină.

Curentul I_0 produce tensiunea magnetomotoare:

$$F_0 = N_1 I_0, \tag{4.17}$$

care la rîndul ei produce fluxul Φ care se închide prin miezul magnetic al transformatorului și fluxul de scăpări Φ_{s1}.

Fluxul Φ induce în înfășurarea primară și cea secundară tensiunile electromotoare E_1 respectiv E_2, care au valorile indicate de relațiile (4.2) și (4.4). Deoarece secundarul este deschis, prin înfășurarea secundară nu circulă curent și deci $I_2 = 0$; $F_2 = 0$; $\Phi_{s2} = 0$. Ecuațiile de funcționare în gol sînt deci:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + R_1\underline{I}_0 + jX_1\underline{I}_0; \tag{4.18}$$

$$\underline{U}_{20} = \underline{E}_2. \tag{4.19}$$

În relația (4.19,) tensiunea în secundar a fost notată cu U_{20} pentru a se indica că este vorba de valoarea la funcționarea în gol.

Raportul de transformare este raportul între valorile tensiunii electromotoare primare și secundare. Folosindu-se relațiile (4.2) și (4.4) se obține:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{4{,}44fN_1\Phi}{4{,}44fN_2\Phi} = \frac{N_1}{N_2}. \tag{4.20}$$

Deoarece la mersul în gol, $E_2 = U_{20}$, iar căderile de tensiune în primar au valori reduse și pot fi neglijate, și deci se poate considera $E_1 \cong U_1$, raportul de transformare se poate scrie:

$$K = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} \cong \frac{U_1}{U_{20}}. \tag{4.21}$$

Relația (4.21) permite determinarea raportului de transformare printr-o încercare de mers în gol, prin măsurarea valorilor U_1 și U_{20} și calcularea raportului lor.

Curentul de mers în gol are două componente: o componentă inductivă sau magnetizantă I_{0r}, care produce fluxul magnetic și este în fază cu acest flux, și o componentă activă I_{0a}, în fază cu tensiunea U_1. Valoarea componentei inductive I_{0r} depinde de numărul de spire ale înfășurării primare N_1, de mărimea fluxului Φ și de reluctanța circuitului magnetic. Componenta I_{0a} este corespunzătoare puterii active necesare acoperirii pierderilor în fier ale transformatorului și are valoarea:

$$I_{0a} = \frac{P_{Fe}}{U_1}, \tag{4.22}$$

în care P_{Fe} sînt pierderile în fier.

În funcție de componentele sale, curentul I_0 se obține din expresia:

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0r}^2}. \tag{4.23}$$

Diagrama fazorială a funcționării transformatorului în gol este reprezentată în figura 4.6.

Pe axa reală este luat fluxul $\underline{\Phi}$. În fază cu $\underline{\Phi}$ este reprezentată componenta inductivă $\underline{I}_{0r}$, a curentului de mers în gol, iar defazat cu $\frac{\pi}{2}$ înainte, componenta activă $\underline{I}_{0a}$. Suma acestor două componente reprezintă curentul de mers în gol $\underline{I}_0$, care este defazat înaintea fluxului $\underline{\Phi}$ cu unghiul α.

În fază cu I_0 este fluxul de scăpări $\underline{\Phi}_{s1}$, iar defazat cu $\frac{\pi}{2}$ în urma acestuia este t.e.m. $\underline{E}_{s1}$. T.e.m. $\underline{E}_1$ și $\underline{E}_2$ sînt defazate în urma fluxului $\underline{\Phi}$ cu $\frac{\pi}{2}$. Pentru obținerea fazorului tensiunii $\underline{U}_1$ pe diagramă, se adună cele trei componente ale ei după ecuația (4.18). Se trasează $-\underline{E}_1$ opus lui $\underline{E}_1$, de la vîrful fazorului $\underline{E}_1$ se trasează în continuare căderea de tensiune $R_1\underline{I}_0$ în fază cu $\underline{I}_0$, apoi în continuare se trasează căderea de tensiune reactivă $jX_1\underline{I}_0$, egală și opusă cu $\underline{E}_{s1}$. Fazorul trasat din origine la vîrful acestei ultime căderi de tensiune, care închide poligonul, este $\underline{U}_1$. Rezultă că la mersul în gol $\underline{I}_0$ este defazat în urma lui $\underline{U}_1$ cu unghiul φ_0.

Pentru un transformator ideal, fără pierderi în fier și fără căderi de tensiune, ecuațiile (4.18) și (4.19) ar deveni:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1; \tag{4.24}$$

$$\underline{U}_{20} = \underline{E}_2, \tag{4.25}$$

iar diagrama fazorială ar fi simplificată (fig. 4.7).

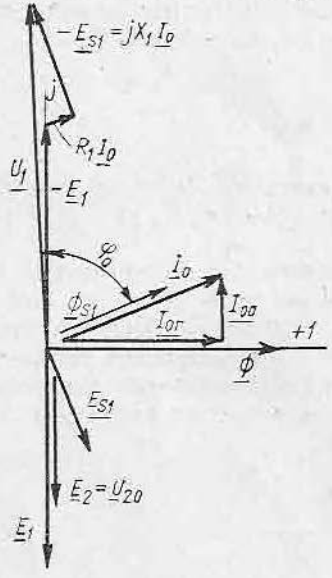


Fig. 4.6. Diagrama de fazori a funcționării transformatorului în gol.

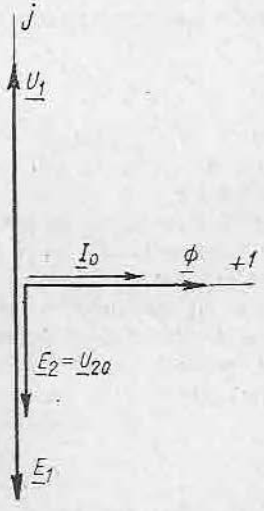


Fig. 4.7. Diagrama de fazori a funcționării transformatorului ideal în gol.

Transformatorul funcționează în sarcină cînd înfășurarea secundară este conectată la un receptor.

În figura 4.8 este reprezentată schema unui transformator monofazat în sarcină pe o impedanță $\underline{Z} = R + jX$. Cunoscînd impedanța complexă a secundarului $\underline{Z}_2 = R_2 + jX_2$ curentul $\underline{I}_2$ se poate determina din ecuația:

$$\underline{E}_2 = \underline{I}_2 [R + R_2 + j(X + X_2)]. \tag{4.26}$$

Curentul $\underline{I}_2$ este defazat în urma t.e.m. E_2 cu unghiul ψ a cărei valoare este dată de relația:

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{X + X_2}{R + R_2}. \tag{4.27}$$

Valoarea eficace a curentului $\underline{I}_2$ se poate calcula cu relația:

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{(R_2 + R)^2 + (X_2 + X)^2}}. \tag{4.28}$$

Fenomenele care se petrec la funcționarea în sarcină a transformatorului au fost arătate la paragraful B_2, iar ecuațiile de funcționare sînt (4.15) și (4.16).

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + R_1\underline{I}_1 + jX_1\underline{I}_1; \tag{4.15}$$

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_2 - R_2\underline{I}_2 - jX_2\underline{I}_2. \tag{4.16}$$

Deoarece căderile de tensiune în înfășurarea primară reprezintă numai 3—5% din valoarea tensiunii aplicate, se poate considera că valoarea fluxului util la mersul în gol este egală cu valoarea fluxului util la mersul în sarcină.

La funcționarea în gol, fluxul Φ era produs de tensiunea magnetomotoare $\underline{F}_0 = N_1\underline{I}_0$. La funcționarea în sarcină, t.m.m. se compun după ecuația:

$$N_1\underline{I}_1 + N_2\underline{I}_2 = N_1\underline{I}_0 \tag{4.29}$$

din care se deduce:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_0 + \left(-\underline{I}_2 \frac{N_2}{N_1}\right), \tag{4.30}$$

care arată cum depinde valoarea curentului în primar, de mărimea curentului din secundar.

În figura 4.9 este reprezentată diagrama fazorială a funcționării transformatorului în sarcină. Pe axa reală este luat fluxul Φ, și defazat înainte cu unghiul α este reprezentat curentul $\underline{I}_0$. Defazat cu $\frac{\pi}{2}$ în urma fluxului sînt t.e.m. $\underline{E}_1$ și $\underline{E}_2$,

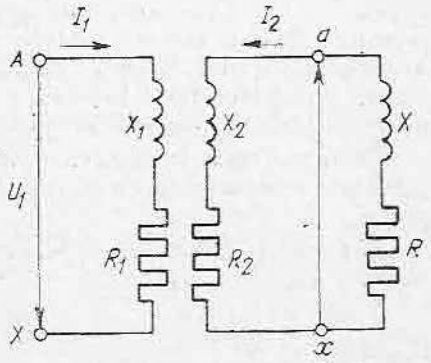


Fig. 4.8. Schema electrică a unui transformator funcționînd în sarcină.

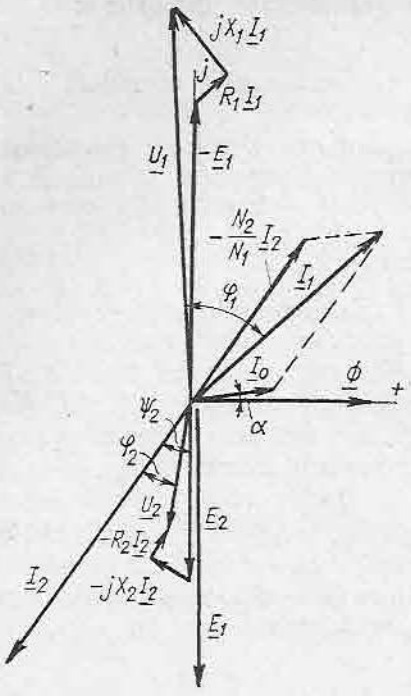


Fig. 4.9. Diagrama de fazori a funcționării transformatorului în sarcină.

În urma t.e.m. $\underline{E}_2$ cu unghiul ψ_2 calculat cu relația (4.27) se găsește $\underline{I}_2$ (din relația 4.26 sau 4.28). Pentru reprezentarea curentului $\underline{I}_1$ se folosește relația (4.30.) Se trasează mai întîi $-\underline{I}_2\frac{N_2}{N_1}$ opus la $\underline{I}_2$ și apoi se compune cu $\underline{I}_0$ aflîndu-se $\underline{I}_1$. Pentru determinarea tensiunii $\underline{U}_1$, se folosește relația (4.15.) Se trasează mai întîi $-\underline{E}_1$ în sens opus lui $\underline{E}_1$, din vîrful acestuia se trasează căderea de tensiune activă $R_1\underline{I}_1$ în fază cu $\underline{I}_1$ și apoi căderea de tensiune inductivă defazată cu $\frac{\pi}{2}$ înaintea lui $\underline{I}_1$, iar fazorul care închide poligonul este $\underline{U}_1$. Pentru determinarea tensiunii $\underline{U}_2$, se folosește ecuația (4.16). Din vîrful fazorului $\underline{E}_2$ se trasează $-jX_2\underline{I}_2$ defazat cu $\frac{\pi}{2}$ în urma lui $\underline{I}_2$ și apoi $-R_2\underline{I}_2$ opus cu fază lui $\underline{I}_2$. Fazorul care închide poligonul este $\underline{U}_2$. Pe diagramă sînt determinate și defazajul φ_1 între $\underline{U}_1$ și $\underline{I}_1$ și defazajul φ_2 între $\underline{U}_2$ și $\underline{I}_2$.

5. SCHEMA ECHIVALENTĂ A TRANSFORMATORULUI

Raportul de transformare îngreuiază compararea parametrilor (rezistențe, reactanțe, căderi de tensiune, curenți, tensiuni electromotoare) celor două înfășurări ale transformatorului. Pentru aceasta se obișnuiește să se raporteze toți parametrii transformatorului la același număr de spire, de regulă N_1, adică parametrii înfășurării secundare se raportează la înfășurarea primară. Pentru aceasta se înlocuiește în calcul înfășurarea secundară, cu o înfășurare avînd N_1 spire ca și înfășurarea primară, toți parametrii înfășurării secundare fiind înlocuiți cu alți parametri recalculați astfel ca să nu se influențeze regimul de funcționare a transformatorului.

Toate mărimile înfășurării secundare care sînt raportate se numesc mărimi raportate și se notează cu aceleași simboluri însoțite de semnul prim, de exemplu E_2'; I_2'; r_2' etc.

Raportarea t.e.m. din secundar se face proporțional cu raportul de transformare K:

$$E_2' = KE_2;$$

$$E_2' = KE_{s2}. \tag{4.31}$$

Curentul secundar se raportează invers proporțional cu K;

$$I_2' = \frac{1}{K} I_2. \tag{4.32}$$

Rezistența, reactanța și impedanța din secundar se raportează astfel ca să nu se schimbe căderea de tensiune procentuală față de t.e.m. E_2, adică:

$$\frac{R_2' I_2'}{E'} = \frac{R_2 I_2}{E_2}$$

și

$$\frac{X_2' I_2'}{E_2'} = \frac{X_2 I_2}{E_2},$$

de unde rezultă raportarea proporțională cu K^2:

$$R_2' = K^2 R_2$$
$$X_2' = K^2 X_2. \tag{4.33}$$

Este de remarcat că pierderile în cupru din secundar nu-și modifică valoarea prin raportare:

$$P_{cu2} = R_2' I_2'^2 = K^2 R_2 \frac{1}{K^2} I_2^2 = R^2 I_2^2. \tag{4.34}$$

Unghiurile de defazaj între tensiuni, curenți și fluxuri nu se modifică la raportare.

Transformatorul la care s-au raportat parametrii înfășurării secundare la înfășurarea primarului se numește *transformator echivalent.*

Ecuațiile transformatorului echivalent devin:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + R_1 \underline{I}_1 + \mathrm{j} X_1 \underline{I}_1; \tag{4.35}$$

$$\underline{U}_2' = E_2' - R_2' \underline{I}_2' - \mathrm{j} X_2' \underline{I}_2', \tag{4.36}$$

în care $\underline{E}_1 = \underline{E}_2$.

Ecuațiile devin și mai simple, dacă se neglijează curentul de mers în gol. $\underline{I}_0$. În acest caz $\underline{I}_1 = -\underline{I}_2'$, iar din ecuațiile (4.35) și (4.36,) ținînd seamă că $\underline{E}_1 = \underline{E}_1'$ și $\underline{I}_1 = -\underline{I}_2'$, rezultă prin adunare:

$$\underline{U}_1 + \underline{U}_2' = \underline{I}_1 [R_1 + R_2' + \mathrm{j}(X_1 + X_2')]. \tag{4.37}$$

Aceasta este ecuația simplificată a transformatorului a cărui schemă echivalentă este reprezentată în figura 4.10.

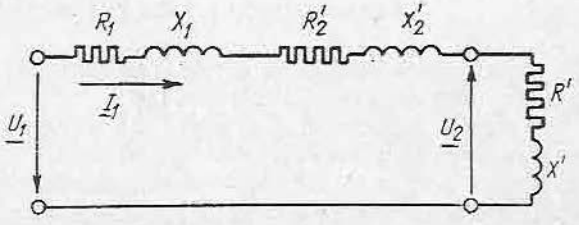


Fig. 4.10. Schema electrică echivalentă simplificată a transformatorului.

6. ÎNCERCAREA ÎN SCURTCIRCUIT ȘI TENSIUNEA DE SCURTCIRCUIT

Încercarea în scurtcircuit se efectuează pentru a determina tensiunea de scurtcircuit a transformatorului, mărime importantă în cunoașterea funcționării transformatorului și care este indicată totdeauna pe plăcuța de fabricație.

Dacă primarul unui transformator cu secundarul legat în scurtcircuit este alimentat cu o tensiune redusă U_{kn}, astfel încît prin înfășurările primară și secundară să circule curenții nominali, raportul:

$$u_k = \frac{U_{kn}}{U_{1n}} \cdot 100\,[\%] \tag{4.38}$$

definește tensiunea de scurtcircuit nominală, exprimată în procente din tensiunea nominală primară a transformatorului.

Valoarea tensiunii de scurtcircuit depinde de puterea și tensiunea transformatorului, putînd avea valori de la 4% la 12%.

La încercarea în scurtcircuit, tensiunea aplicată primarului fiind redusă (doar cîteva procente din tensiunea nominală), și valoarea fluxului este redusă, așa încît se poate considera că tensiunea magnetomotoare rezultantă este nulă, adică:

$$N_1 \underline{I}_1 + N_2 \underline{I}_2 = 0. \tag{4.39}$$

Din această relație, considerînd valorile absolute ale curenților, se deduce:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} = K. \tag{4.40}$$

Deci la funcționarea în scurtcircuit, raportul de transformare este egal cu raportul dintre curentul secundar și curentul primar.

Înlocuind în ecuația (4.37) pe $\underline{U}_1 = \underline{U}_k$ și pe $\underline{U}'_2 = 0$ (deoarece la scurtcircuit $\underline{U}_2 = 0$), rezultă:

$$\underline{U}_k = [R_1 + R'_2 + \mathrm{j}(X_1 + X'_2)]\underline{I}_1. \tag{4.41}$$

Notînd cu $R_k = R_1 + R'_2$ rezistența totală echivalentă și cu $X_k = X_1 + X'_2$ reactanța totală echivalentă, rezultă:

$$U_k = (R_k + \mathrm{j}X_k)\underline{I}_1. \tag{4.42}$$

Ecuațiile (4.41), (4.42) sînt reprezentate în figura 4.11, numită și *triunghiul de scurtcircuit al transformatorului.*

7. CARACTERISTICA EXTERNĂ A TRANSFORMATORULUI

Caracteristica externă a transformatorului este curba $U_2 = f(I_2)$ trasată pentru diferite valori ale lui cos φ_2.

Această caracteristică se poate obține printr-o încercare directă în sarcină, pentru diferite valori ale cos φ_2, alimentînd transformatorul în primar cu tensiunea nominală. Se obțin curbele din figura 4.12 în care sînt trasate două caracteristici, una pentru cos $\varphi_2 = 1$ și alta pentru cos $\varphi_2 = 0{,}8$.

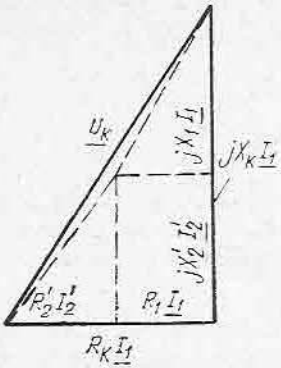


Fig. 4.11. Triunghiul de scurtcircuit al transformatorului.

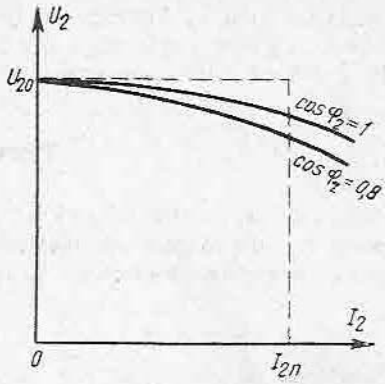


Fig. 4.12. Caracteristica externă a transformatorului.

Se numește variația tensiunii transformatorului, sau căderea procentuală de tensiune, pentru un anumit factor de putere cos φ_2, diferența aritmetică între tensiunea secundară nominală la funcționarea în gol și tensiunea secundară corespunzătoare curentului secundar nominal, raportată la tensiunea secundară la funcționarea în gol și exprimată în procente:

$$\Delta U_n\,\% = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}}\,100[\%], \tag{4.43}$$

tensiunea primară avînd valoarea nominală.

8. PIERDERILE ȘI RANDAMENTUL

Pierderile în transformator sînt formate din pierderile în fier (în miezul magnetic) și pierderile în cupru (în înfășurări).

a. Pierderile în fier

Pierderile în miezul magnetic al transformatorului sînt pierderile prin histerezis și pierderile prin curenți Foucault.

Calculul pierderilor în fier se poate face cu relația:

$$P_{Fe} = G_{Fe} p_{Fe}, \tag{4.44}$$

unde G_{Fe} este masa totală a miezului transformatorului, iar p_{Fe} sînt pierderile specifice corespunzătoare inducției existente în miez.

Pierderile în fier se determină printr-o încercare de funcționare în gol. La funcționarea în gol, puterea activă absorbită de primare de la rețea P_0 este transformată în căldură sub formă de pierderi în fier și pierderi în cuprul înfășurării primare, adică:

$$P_0 = P_{Fe} + R_1 I_0^2. \tag{4.45}$$

Cum valoarea curentului de mers în gol este mică, pierderile în cupru la mersul în gol se pot neglija și rezultă că $P_0 \cong P_{Fe}$, adică pierderile la mersul în gol reprezintă pierderile în fier.

b. Pierderile în cupru

Pierderile în cupru se produc în înfășurarea primară și cea secundară, valoarea lor depinzînd de mărimea rezistențelor primară și secundară și mărimea curenților. Pierderile în cupru se pot calcula cu relația:

$$P_{Cu} = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2. \tag{4.46}$$

Pierderile în cupru se pot determina printr-o încercare în scurtcircuit, alimentînd primarul cu o tensiune redusă, astfel ca prin înfășurări să circule curenții nominali.

Deoarece la funcționarea în scurtcircuit, fluxul în miezul transformatorului este foarte mic, pierderile în fier se pot neglija, astfel încît puterea activă P_k absorbită la funcționarea în scurtcircuit reprezintă pierderile în cupru.

c. Randamentul transformatorului

Randamentul transformatorului η este, ca la orice mașină sau aparat electric raportul dintre puterea P_2 furnizată de secundar și puterea P_1 absorbită de primar, adică raportul:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}.$$

Făcînd înlocuirea $P_1 = P_2 + P_{Fe} + P_{Cu}$ se obține:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{Fe} + P_{Cu}}. \tag{4.47}$$

C. TRANSFORMATOARE TRIFAZATE

1. FUNCȚIONAREA TRANSFORMATORULUI TRIFAZAT

Transformatorul trifazat este utilizat în rețele trifazate de transport și distribuție și are ponderea cea mai mare în fabricația de transformatoare.

În sistemele trifazate, transformarea se poate realiza și cu ajutorul a trei transformatoare monofazate, cîte unul pe fiecare fază, avînd înfășurările lor primare și respectiv secundare legate în stea sau în triunghi.

Soluția cea mai economică și utilizată în general este folosirea unui transformator trifazat, care are înfășurările corespunzătoare celor trei faze așezate pe un singur miez, numit miez trifazat, ca în figura 4.13. Pe fiecare coloană a miezului este așezată o înfășurare corespunzătoare unei faze a primarului și cîte o înfășurare corespunzătoare unei faze a secundarului.

Se știe că în sistemele trifazate, tensiunile, respectiv curenții de pe fiecare fază, sînt defazate între ele cu 120° și în orice moment suma valorilor instantanee ale tensiunilor sau ale curenților este egală cu zero. Ca urmare, și suma valorilor instantanee ale fluxurilor produse de acești curenți este egală cu zero, adică:

$$\underline{\Phi_1} + \underline{\Phi_2} \pm \underline{\Phi_3} = 0. \qquad (4.48)$$

De aceea se poate construi miezul trifazat cu trei coloane prin care se formează aceste fluxuri, așa cum se realizează sistemele electrice trifazate cu trei înfășurări, fără conductor de întoarcere.

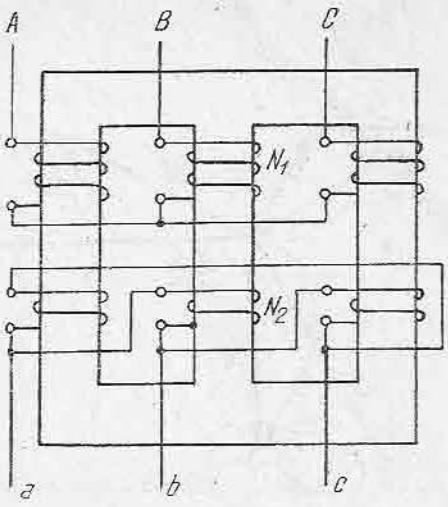


Fig. 4.13. Transformator trifazat.

Fenomenele care se petrec pe fiecare din cele trei faze ale transformatorului trifazat sînt identice cu cele studiate la transformatorul monofazat, iar diagrama fazorială a transformatorului monofazat poate fi considerată ca diagrama fazorială a unei faze a transformatorului trifazat. Trebuie menționat că la transformatorul trifazat, pentru a determina tensiunile între faze și curenții în linie, trebuie ținut seama de conexiunile înfășurării.

2. CONEXIUNILE TRANSFORMATOARELOR TRIFAZATE

Cele trei faze ale fiecărei înfășurări a transformatorului trifazat (primară și secundară) pot fi legate în trei feluri: *în stea*, *în triunghi* sau *în zigzag* (fig. 4.14).

Relațiile între tensiunile între faze și cele pe fază și între curenții în linie și cei pe fază sînt:

— la legarea **în stea**:

$$U_{AB} = \sqrt{3}U_f; \quad I = I_f; \qquad (4.49)$$

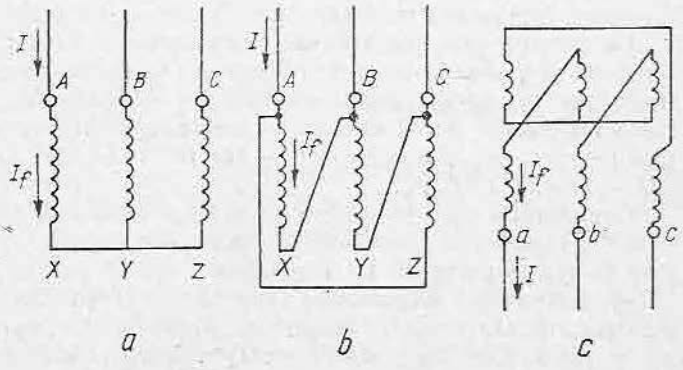


Fig. 4.14. Schemele conexiunilor bobinajelor trifazate:
a — stea; *b* — triunghi; *c* — zigzag.

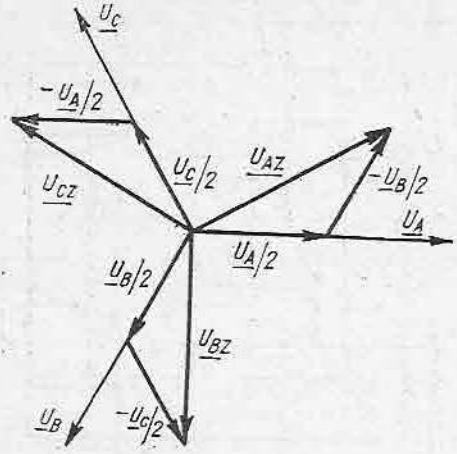


Fig. 4.15. Diagrama fazorială a tensiunilor la conexiunea zigzag.

— la legarea **în triunghi**:

$$U_{AB} = U_f; \quad I = \sqrt{3} I_f. \qquad (4.50)$$

La conexiunea **zigzag**, bobinajul fiecărei faze este împărțit în două jumătăți, care se așază pe coloane diferite. Compunerea tensiunilor electromotoare la conexiunea zigzag este arătată în figura 4.15. Pe diagramă sînt reprezentate și tensiunile U_A pentru conexiunea stea care s-ar obține în cazul cînd ambele jumătăți de bobinaj ar fi montate pe aceeași coloană.

Rezultă că tensiunea pe fază la conexiunea zigzag este:

$$U_{AZ} = \frac{\sqrt{3}}{2} U_A = 0{,}865\ U_A. \qquad (4.51)$$

● **Grupe de conexiuni.** Există mai multe posibilități de conexiune a transformatorului trifazat, primarul putînd fi legat în stea sau triunghi, iar secundarul în stea, în triunghi sau zigzag.

Conexiunea unui transformator este simbolizată prin două litere, una mare și una mică, și un număr.

Prima literă, care este mare, simbolizează conexiunea înfășurării de înaltă tensiune; ea poate fi Y pentru conexiunea stea sau D pentru triunghi. A doua literă, care este mică, simbolizează conexiunea înfășurării de joasă tensiune; ea poate fi y pentru conexiunea stea, d pentru conexiunea triunghi sau z pentru conexiunea zigzag. În cazul cînd punctul neutru este scos la un izolator pe capac, simbolul conexiunii respective se completează cu indicele zero, de exemplu Y_0, y_0, z_0.

Numărul care urmează grupului de litere poate fi de la 1 la 12 și indică defazajul între tensiunile electromotoare primară și secundară. Acest număr înmulțit cu 30 indică în grade unghiul de defazaj negativ (în urmă) al fazorului tensiunii electromotoare între două borne de joasă tensiune, față de fazorul tensiunii electromotoare între bornele corespunzătoare de înaltă tensiune.

Unghiul de defazaj depinde de tipul conexiunii și de modul de legare a capetelor înfășurării la borne (sau de sensul de înfășurare al bobinelor).

Ca urmare, prin combinarea conexiunilor înfășurărilor (Y sau D la înaltă tensiune și y, d, z la joasă tensiune) se pot obține șase tipuri de conexiuni și ținîndu-se seama de efectul sensului de bobinare sau al legării la borne, rezultă un număr de 12 conexiuni posibile. Dintre acestea sînt standardizate șapte conexiuni, și anume $Yy - 12$, $Dy - 11$, $Yz - 11$, $Dy - 5$, $Yz - 5$, $Yd - 11$ și $Yd - 5$.

Conexiunile care în simbol au același număr formează o grupă de conexiuni. Cunoașterea grupei de conexiuni din care fac parte transformatoarele este foarte importantă la funcționarea lor în paralel.

● **Construirea diagramelor fazoriale la diferite tipuri de conexiuni.** Pentru a verifica defazajul dintre tensiunile electromotoare E_1 și E_2 la diferite conexiuni, se construiesc diagrame fazoriale, ținînd seama de conexiunea și modul

de legarea înfășurărilor. În toate cazurile următoare se consideră că sensul de bobinaj la cele două înfășurări este același.

Conexiunea stea-stea având schema electrică reprezentată în figura 4.16 are capetele de bobinaj legate în același sens, iar tensiunile electromotoare pe fază din secundar în fază cu cele din primar. Se întocmește mai întîi diagrama fazorială a tensiunilor electromotoare din primar. Tensiunile E_A, E_B și E_C sînt tensiunile electromotoare pe fază, defazate între ele cu 120°. Compunîndu-se fazorii doi cîte doi, se găsesc fazorii tensiunilor la borne. Se trasează apoi fazorii E_a, E_b și E_c ai tensiunilor electromotoare pe fază în secundar, care sînt în fază cu cei din primar, așa cum s-a arătat mai înainte. Compunînd și acești fazori doi cîte doi, se găsește triunghiul *abc* al tensiunilor electromotoare de la bornele secundarului. Se constată că E_{ab} este în fază cu E_{AB}, adică unghiul dintre fazorii lor este zero sau 360°, și deci conexiunea este $Yy-12$, unde *12* simbolizează un unghi de $12 \times 30 = 360°$.

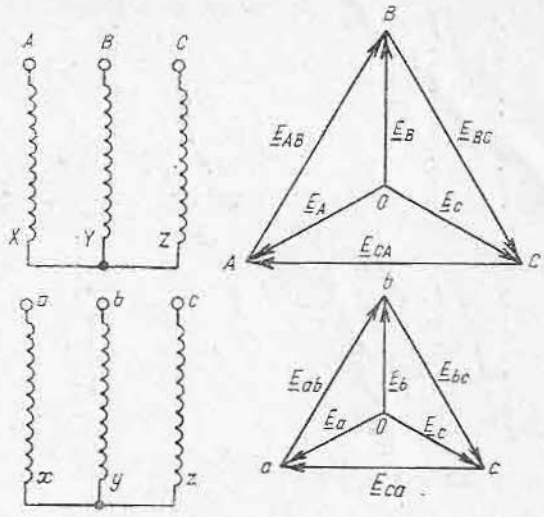


Fig. 4.16. Conexiunea Yy — 12

Conexiunea stea-triunghi are schema electrică și triunghiul *ABC* al tensiunilor electromotoare primare reprezentate în figura 4.17. Se observă că în secundar E_{ab} (de la *a* la *b*) este egal cu E_b. Deci fazorul E_{ab} are aceeași direcție și sens cu fazorul E_B. În mod asemănător se construiesc fazorii E_{bc} în fază cu E_c și E_{ca} în fază cu E_A. Unghiul pe care îl face E_{ab} cu E_{AB} este de 330°, adică $11 \times 30°$ și deci conexiunea este Yd — 11.

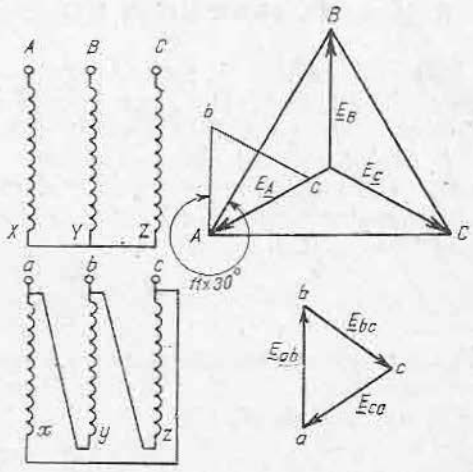


Fig. 4.17. Conexiunea Yd — 11.

Conexiunea stea-triunghi are schema electrică din figura 4.18 în care triunghiul secundar este legat invers ca în cazul precedent. Tensiunea electromotoare E_{ab} este egală cu E_b, care din cauza inversării legăturilor este în opo-

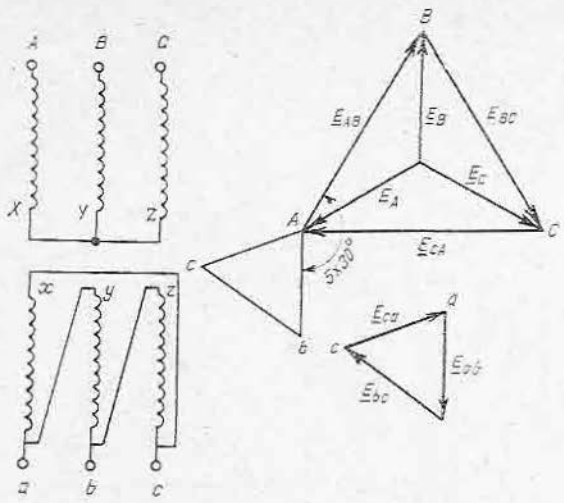


Fig. 4.18. Conexiunea $Yd - 5$.

ziție cu E_B. Deci, se construiește E_{ab} în sens invers cu E_B și la fel E_{bc} în sens invers cu E_C și E_{ca} în sens invers cu E_A. Unghiul pe care îl face E_{ab} cu E_{AB} este de 150°, adică $5 \times 30°$ și deci conexiunea este $Yd - 5$.

3. RAPORTUL DE TRANSFORMARE LA TRANSFORMATOARE TRIFAZATE

Raportul de transformare K al unui transformator trifazat se definește ca raport între tensiunile electromotoare compuse (între faze) de la bornele înfășurării primare și de la bornele înfășurării secundare. El poate fi diferit de raportul K_N dintre numărul de spire pe fază al bobinajului primar și secundar, în funcție de conexiunea transformatorului.

La transformatorul monofazat, se știe că raportul de transformare este:

$$K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = K_N, \tag{4.52}$$

adică raportul de transformare este egal cu raportul numărului de spire)

Același lucru rezultă și la transformatoarele trifazate cu conexiunile Dd și Yy, adică $K = K_N$.

La conexiunea Yd, tensiunea între faze la primar este de $\sqrt{3}$ ori mai mare decît tensiunea pe fază, tensiunea între faze la secundar este egală cu tensiunea pe fază, iar raportul de transformare rezultă:

$$K = \frac{E_{AB}}{E_{ab}} = \frac{\sqrt{3}E_A}{E_a} = \sqrt{3}\frac{N_1}{N_2} = \sqrt{3}K_N. \tag{4.53}$$

La conexiunea Dy, se demonstrează la fel că raportul de transformare este:

$$K = \frac{E_{AB}}{E_{ab}} = \frac{E_A}{\sqrt{3}E_a} = \frac{1}{\sqrt{3}}\frac{N_1}{N_2} = \frac{1}{\sqrt{3}}K_N. \tag{4.54}$$

Puterea absorbită din rețea de primarul transformatorului este de trei ori mai mare decît puterea pe o fază, adică:

$$P_1 = 3U_{1f}I_{1f}\cos\varphi_1.$$

Se demonstrează ușor că, indiferent dacă primarul este legat în stea sau în triunghi, puterea exprimată în funcție de tensiunea între faze și curentul în linie este:

$$P_1 = \sqrt{3}U_1I_1\cos\varphi_1. \tag{4.55}$$

Analog, puterea debitată de secundar este:

$$P_2 = \sqrt{3}U_2I_2\cos\varphi_2. \tag{4.56}$$

Pierderile în fier se calculează și se determină la fel ca la transformatorul monofazat.

Pierderile în cupru se determină cu relația:

$$P_{Cu} = 3R_{1f}I_{1f}^2 + 3R_{2f}I_{2f}^2 = 3R_kI_{1f}^2 \tag{4.57}$$

toate mărimile cu indice f fiind pe fază.

Randamentul se calculează cu aceeași relație (4.47) de la transformatorul monofazat.

D. FUNCȚIONAREA ÎN PARALEL A TRANSFORMATOARELOR

Cînd puterea cerută unui transformator depășește valoarea puterii sale nominale, se montează în paralel mai multe transformatoare. Bobinajele primare sînt alimentate de la aceeași rețea, iar bobinajele secundare alimentează aceeași rețea.

Condițiile pe care trebuie să le îndeplinească transformatoarele pentru a funcționa în paralel în condiții optime sînt:

1 — să aibă aceeași grupă de conexiuni (numai pentru transformatoare trifazate);

2 — primarul și secundarul să fie conectat astfel încît fazele transformatoarelor să se găsească în concordanță;

3 — tensiunile nominale, primare și secundare, să fie egale (această condiție implică egalitatea rapoartelor de transformare);

4 — tensiunile de scurtcircuit să fie egale;

5 — puterile transformatoarelor ce se leagă în paralel să nu depășească raportul 3:1.

Nerespectarea primelor două condiții face imposibilă funcționarea în paralel a transformatoarelor.

Concordanța fazelor (a doua condiție) se poate controla cu o lampă (de tensiune dublă față de tensiunea secundară) sau cu un voltmetru.

La transformatoarele monofazate, concordanța fazelor se verifică ca în figura 4.19. Transformatorul TR_1 fiind conectat la rețeaua secundară, se leagă

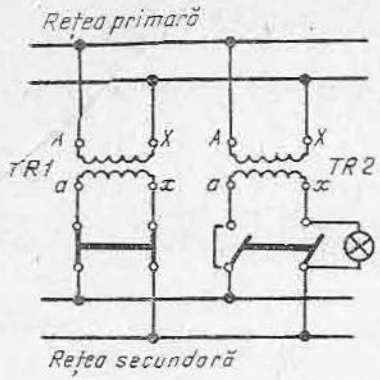


Fig. 4.19. Verificarea opoziției fazelor la cuplarea în paralel a două transformatoare monofazate.

o bornă a transformatorului TR_2 la una din bare și se controlează cu lampa (sau cu un voltmetru) borna rămasă liberă și cealaltă bară.

Dacă lampa rămîne stinsă (sau voltmetrul indică zero) transformatorul TR_2 poate fi conectat, iar dacă lampa arde (sau voltmetrul indică o tensiune dublă față de tensiunea secundarului) trebuie schimbate legăturile transformatorului TR_2 la bare.

La transformatoarele trifazate se leagă o bornă a secundarului la una din bare și se verifică cu lampa sau cu voltmetrul celelalte două borne și bare libere, care urmează a fi cuplate.

Dacă în ambele cazuri lampa nu arde sau voltmetrul indică zero, se poate face cuplarea.

Dacă celelalte condiții de funcționare în paralel, adică egalitatea raporturilor de transformare și a tensiunilor de scurtcircuit nu sînt satisfăcute în limitele anumitor toleranțe, transformatoarele care funcționează în paralel nu se încarcă proporțional cu puterile lor, și deci puterea maximă care se poate obține de la grupul de transformatoare funcționînd în paralel este limitată de unul din transformatoarele care funcționează la puterea nominală, pe cînd celelalte transformatoare sînt încărcate mai puțin.

E. AUTOTRANSFORMATORUL

Autotransformatorul este format, ca și transformatorul dintr-un miez magnetic și două înfășurări, una primară și alta secundară, însă acestea au contact galvanic între ele, iar înfășurarea de joasă tensiune constituie o parte a înfășurării de înaltă tensiune.

În schema unui autotransformator monofazat coborîtor ca cel din figura 4.20, *a*, porțiunea de înfășurare aX este înfășurarea de joasă tensiune cu N_2 spire, iar porțiunea AX reprezintă înfășurarea de înaltă tensiune cu N_1 spire, din care (N_1-N_2) spire pe porțiunea Aa, și N_2 spire ale înfășurării de joasă tensiune pe porțiunea aX.

Expresiile tensiunilor electromotoare induse și ale raportului de transformare sînt aceleași ca la transformator.

La mersul în sarcină la autotransformatorul ideal, fără pierderi și fără căderi de tensiune și considerînd defazajul primar egal cu cel secundar, se poate scrie din condiția ca puterea de ieșire să fie egală cu puterea de intrare:

$$K = \frac{N_1}{N_2} \cong \frac{U_1}{U_2} \cong \frac{I_2}{I_1}. \tag{4.58}$$

În înfășurarea de joasă tensiune aX, circulă curentul $\underline{I}_3$, egal cu diferența dintre curenții $\underline{I}_2$ și $\underline{I}_1$:

$$\underline{I}_3 = \underline{I}_2 - \underline{I}_1 = \underline{I}_2 - \frac{\underline{I}_2}{K} = \underline{I}_2\left(1 - \frac{1}{K}\right). \tag{4.59}$$

Din această relație rezultă că în înfășurarea secundară aX circulă un curent mai mic decît curentul secundar în linie, și cu atît mai mic cu cît raportul de transformare K este mai mic.

Aceasta dă posibilitatea ca înfășurarea aX să fie executată cu o secțiune de conductor mai mică decît la un transformator obișnuit și rezultă o economie de cupru și deci un preț de cost mai redus.

Cazul limită corespunde raportului de transformare $K = 1$, cînd tensiunea secundară este egală cu tensiunea primară și cînd borna a coincide cu borna A. Curentul I_3 conform relației (4.59) ar deveni nul, deoarece s-a neglijat curentul de magnetizare, iar autotransformatorul devine deci o bobină de inductanță legată la rețea.

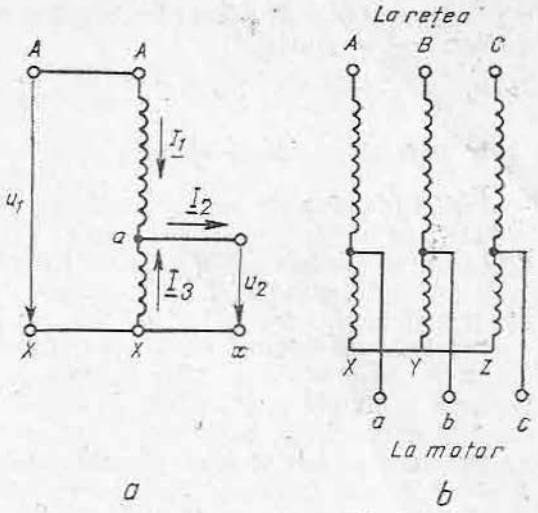


Fig. 4.20. Schemele autotransformatoarelor: *a* — autotransformator monofazat coborîtor; *b* — autotransformator trifazat de pornire.

Se construiesc autotransformatoare monofazate și trifazate, cu raportul de transformare de maximum $K = 2$, deoarece pe de o parte peste această valoare economia realizată este prea mică față de transformator, iar pe de altă parte, autotransformatorul prezintă inconvenientul că, în cazul întreruperii porțiunii aX din înfășurare, înalta tensiune pătrunde în rețeaua de joasă tensiune punînd în pericol receptoarele și personalul de deservire.

Autotransformatoarele se utilizează în rețele de transport, ca ridicătoare sau coborîtoare de tensiune, la pornirea motoarelor sincrone și asincrone, la reglarea vitezei motoarelor de curent alternativ cu colector etc.

În figura 4.20, *b* este reprezentată schema unui autotransformator trifazat de pornire.

F. EXPLOATARE, DEFECTE ȘI REMEDIERI

● **Exploatare.** Transformatoarele se instalează în stații electrice sau posturi de transformare, fie sub cerul liber, în care caz au borne speciale de exterior, fie în încăperi bine ventilate.

Protecția transformatorului se realizează cu siguranțe fuzibile și relee maximale de curent, împotriva scurtcircuitelor și suprasarcinilor, cu eclatoare împotriva supratensiunilor și cu un releu de gaze, care sesizează defecte locale interioare.

Normele de exploatare prevăd temperatura maximă a aerului ambiant de +40°C, iar a apei de răcire de +25°C.

În exploatare sînt admise suprasarcini de scurtă durată, de exemplu 10% timp de 1 oră sau 30% timp de 15 min, transformatorul de putere fiind

construit astfel ca să poată suporta aceste suprasarcini fără supraîncălzirea înfășurărilor și a uleiului.

Rezistența de izolație nu trebuie să scadă cu mai mult de 20% față de valoarea măsurată în fabrica producătoare.

● **Defecte și remedierea lor**

Defectele înfășurărilor sînt: *scurtcircuitul între spire* și *străpungerea* sau *conturnarea izolației*, ce se pot datora fie defectelor de izolație, fie îmbătrînirii izolației, fie unor supratensiuni. La scurtcircuite, înfășurările fiind supuse unor eforturi electrodinamice mari se pot deforma. În toate cazurile transformatorul trebuie demontat și refăcute înfășurările total sau parțial.

Defectele miezului magnetic sînt: *deteriorarea izolației între tole*, care provoacă încălziri locale și *slăbirea strîngerii miezului*, care produce un bîzîit puternic în timpul funcționării. În ambele cazuri transformatorul se demontează și se reizolează tolele sau se strînge miezul.

Defectele pe care le poate prezenta uleiul sînt: *îmbătrînirea uleiului*, după o perioadă mai lungă de funcționare, prin oxidarea și creșterea acidității, și *umezirea* din cauza unei perioade mai îndelungate de nefuncționare.

Uleiul degradat poate provoca defecte grave în transformator, deoarece își pierde din calitățile sale izolante, de aceea el trebuie purificat sau înlocuit.

În țara noastră se execută o gamă mare de transformatoare: seria unitară de transformatoare de putere de la 10 kVA la 1 600 kVA și 6—35 kV, transformatoare de mare putere, cu reglaj în sarcină de la 2,5 la 63 MW și 35 la 110 kV ș.a. O realizare deosebită, de înaltă tehnicitate, este transformatorul pentru hidrocentrala de la Porțile de Fier de 190 MVA și 220 kV.

Pentru pornirea motoarelor electrice se execută autotransformatoare cu puteri pînă la 1 000 kVA.

PROBLEME

1. Să se calculeze raportul de transformare și t.e.m. E_2 la un transformator monofazat cunoscîndu-se $N_1 = 2\,000$ spire, $N_2 = 500$ spire, $E_1 = 1\,000$ V.

Răspuns: $K = 4$; $E_2 = 250$ V.

2. Un transformator monofazat are $N_1 = 600$ spire și $N_2 = 30$ spire, $\Phi = 0{,}003$ Wb, $f = 50$ Hz. Să se calculeze E_1, E_2 și K.

Răspuns: $E_1 = 399{,}6$ V; $E_2 = 19{,}9$ V; $K = 20$.

3. Un transformator trifazat are raportul de transformare al înfășurărilor de pe fază $K_N = 10$. Să se calculeze raportul de transformare în cazurile cînd înfășurările sînt legate pentru următoarele conexiuni: *Yy*, *Yd*, *Dy*.

Răspuns: 10; 17,3; 5,77.

4. Un transformator monofazat debitează puterea $P_2 = 10$ kW.

Puterea absorbită la mersul în gol este 400 W, iar pierderile în cupru sînt 600 W. Să se calculeze puterea absorbită P_1 și randamentul.

Răspuns: $P_1 = 11$ kW; $\eta = 0{,}99$.

5. Să se calculeze puterea aparentă absorbită de un transformator trifazat, avînd $U_1 = 60$ kV și $I_1 = 10$ A.

Răspuns: 1 038 kVA.

6. Un transformator trifazat are tensiunea secundară nominală $U_2 = 400$ V și curentul secundar nominal $I_2 = 100$ A. Pierderile la mersul în gol sînt 1500 W, iar pierderile la încercarea de scurtcircuit sînt 2 000 W.

Să se calculeze randamentul cînd transformatorul funcționează la $U_2 = 400$ V, $I_2 = 100$A și $\cos \varphi_2 = 0{,}8$.

Răspuns: $P_2 = 55{,}36$ kW; $P_1 = 58{,}86$ kW; $\eta = 0{,}94$.

7. Să se construiască diagrama fazorială pentru conexiunea $Dy - 11$.

8. Un autotransformator are $U_1 = 220$ V, $U_2 = 110$ V, numărul total de spire 400, $I_1 = 5$ A. Neglijînd pierderile și căderile de tensiune, să se calculeze N_2 și I_2.

Răspuns: $N_2 = 200$; $I_2 = 10$ A.

REZUMAT

1. *Tipuri de transformatoare:*

- **După utilizare**
  - de putere
  - autotransformatoare
  - transformatoare de măsură
  - transformatoare de putere mică
  - transformatoare speciale
    - pentru cuptoare
    - pentru redresoare
    - pentru sudare
    - pentru încercări
- **După numărul de faze**
  - monofazate
  - polifazate
    - trifazate
    - hexafazate
    - dodecafazate
- **După sistemul se răcire**
  - în aer
  - în ulei

2. *Construcția transformatorului — părți componente:*

- **Miez**
  - în manta — monofazat
  - cu coloane — trifazat
- **Schelă**
- **Înfășurări**
  - așezate concentric
  - așezate alternat
- **Cuvă**
  - netedă
  - cu pereți ondulați
  - cu țevi
  - cu radiatoare
- **Capac**
- **Conservator**

3. *Parametrii înfășurărilor:*

Parametrul	primar	secundar
numărul de spire	N_1	N_2
rezistența	R_1	R_2
inductanța de scăpări	L_1	L_2
reactanța	$X_1 = L_1\omega$	$X_2 = L_2\omega$
impedanța	$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2}$ în complex $Z_1 = R_1 + jX_1$	$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_2^2}$ în complex $Z_2 = R_2 + jX$

4. *Ecuațiile de funcționare:*

● **Ecuația tensiunilor magnetomotoare:**

$$N_1\underline{I}_1 + N_2\underline{I}_2 = N_1\underline{I}_0$$

– fluxul φ care înlănțuie ambele înfășurări

● **Fluxurile:** – fluxul φ_{s1} care înlănțuie înfășurarea primară

– fluxul φ_{s2} care înlănțuie înfășurarea secundară

● **Ecuațiile de funcționare în valori instantanee:**

$$u_1 = -e_1 + R_1 i_1 - e_{s1}$$

$$u_2 = e_2 - R_2 i_2 + e_{s2}$$

● **Ecuațiile de funcționare în complex:**

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + R_1\underline{I}_1 + jX_1\underline{I}_1$$

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_2 - R_2\underline{I}_2 - jX_2\underline{I}_2$$

● **Valorile termenilor din ecuații:**

e_1 = t.e.m. indusă de φ: $e_1 = -N_1\frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = N_1\Phi\omega \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$ cu valoare eficace: $E_1 = 4{,}44\, fN_1\Phi$ și defazat cu $\frac{\pi}{2}$ în urma lui φ; e_2=t.e.m. indusă de φ: $e_2 = -N_2\frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = N_2\Phi\omega \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$ cu valoarea eficace: $E_2 = 4{,}44\, fN_2\Phi$ și defazat cu $\frac{\pi}{2}$ în urma lui φ:

R_1I_1, R_2I_2, căderi de tensiune active, în fază cu curentul I_1 respectiv I_2;

$jX_1I_1 = -E_{s1}$ și $jX_2I_2 = -E_{s2}$, căderi de tensiune inductive produse de curentul I_1 respectiv I_2;

E_{s1} și E_{s2} sînt defazate în urma curenților respectivi cu $\frac{\pi}{2}$, iar jX_1I_1 și jX_2I_2 sînt defazate înaintea lor cu $\frac{\pi}{2}$.

5. *Funcționarea în gol:*

● **Ecuațiile de funcționare:**

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + R_1\underline{I}_0 + jX_1\underline{I}_0 \\ \underline{U}_{20} = \underline{E}_2 \end{cases}$$

în care:

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0r}^2}$$

$I_{0a} = \frac{P_{Fe}}{U_1}$ — componenta activă;

I_{0r} — componenta inductivă.

● **Raportul de transformare:**

$$K = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} \cong \frac{U_{10}}{U_2}$$

6. *Funcționarea în sarcină:*

● **Valoarea curentului secundar în funcție de impedanța receptorului:**

$$\underline{Z} = R + jX:$$

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{(R_2 + R)^2 + (X_2 + X)^2}}$$

defazat în urma lui E_2 cu unghiul φ_2 avînd valoarea:

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{X_2 + X}{R_2 + R}$$

● **Valoarea curentului primar:**

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_0 + \left(-\frac{N_2}{N_1} \underline{I}_2 \right)$$

● **Căderea procentuală de tensiune:**

$$\Delta U_n = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} 100[\%]$$

7. *Raportarea secundarului la primar și ecuația de funcționare.*

Relații de raportare:

$$E_2' = KE_2; \quad I_2' = \frac{1}{k} I_2; \quad R_2' = K^2 R_2$$

$$X_2' = K^2 X_2$$

$$Z_2' = K^2 Z_2$$

● **Ecuația transformatorului echivalent neglijîndu-se** I_0 și deci cînd:

$$\underline{I}_1 = -\underline{I}_2'; \quad \underline{E}_1 = \underline{E}_2';$$

$$\underline{U}_2 + \underline{U}_2' = \underline{I}_1 [R_1 + R_2' + j(X_1 + X_2')] = \underline{I}_1 [R_k + jX_k]$$

8. *Tensiunea de scurtcircuit:*

$\underline{U}_k = \underline{Z}_K \underline{I}_1$, în care $\underline{Z}_K = R_K + jX_K$ este impedanța totală echivalentă.

În procente: $u_K = \dfrac{U_K}{U_{1n}} \; 100[\%]$

9. *Randamentul:*

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{Fe} + p_{Cu}}, \quad \text{în care} \quad \begin{cases} P_{Fe} = P_0 - R_1 I_0^2 \\ P_{Cu} = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 \end{cases}$$

10. *Transformatorul trifazat:*

● **Relații între tensiuni și curenți:**

stea	triunghi	zigzag
$U_{AB} = \sqrt{3} U_f$	$U_{AB} = U_f$	$U_{AZ} = \dfrac{\sqrt{3}}{2} U_A$
$I = I_f$	$I = \sqrt{3} I_f$	$\underline{I} = \underline{I}_f$

Conexiuni și grupe de conexiuni:

$Yy - 12 \quad Dy - 11 \quad Yd - 11 \quad Yz - 11$

$Dy - 5 \quad Yd - 5 \quad Yz - 5$

Raportul de transformare:

la Yy și Dd $\quad K = Kn$

la Yd $\quad K = \sqrt{3} Kn$

la Dy $\quad K = \dfrac{1}{\sqrt{3}} Kn$

Capitolul 5

ÎNFĂȘURĂRILE STATORULUI MAȘINILOR DE CURENT ALTERNATIV

A. GENERALITĂȚI ASUPRA CÎMPURILOR MAGNETICE ALTERNATIVE

1. CÎMPUL MAGNETIC ALTERNATIV

Se consideră un miez magnetic al unui transformator monofazat, pe care este așezată o bobină cu N spire, parcursă de curentul continuu i. Cîmpul magnetic din miez este constant în timp și are intensitatea:

$$H = \frac{Ni}{l}$$

în care l este lungimea liniei de forță.

Dacă se secționează circuitul magnetic, intensitatea cîmpului este aceeași în toate punctele secțiunii și deci cîmpul este uniform.

Dacă curentul i este alternativ sinusoidal $i = I\sqrt{2}\cos\omega t$, expresia intensității cîmpului este:

$$H = \frac{Ni}{l} = \frac{NI\sqrt{2}}{l}\cos\omega t = H_m \cos\omega t \tag{5.1}$$

și deci cîmpul variază sinusoidal în timp, în fază cu curentul i. La un moment dat t, cîmpul are aceeași valoare în toate punctele secțiunii considerate.

Un astfel de cîmp magnetic, repartizat uniform și alternativ în timp se numește *cîmp uniform alternativ* sau, pe scurt, *cîmp alternativ*.

2. CÎMPUL MAGNETIC MONOFAZAT BIPOLAR

În figura 5.1 este reprezentat un circuit magnetic, format dintr-o armătură cilindrică (statorul) în care se găsește o a doua armătură cilindrică (rotorul). Pe stator este așezat un bobinaj repartizat în 10 crestături, avînd legăturile făcute astfel încît atunci cînd este parcurs de un curent i să se formeze un cîmp magnetic cu doi poli, ale cărui linii de forță se închid prin stator, rotor și întrefier, după liniile trasate întrerupt în figura 5.1. Un astfel de cîmp se numește *cîmp bipolar*.

Liniile de forță în întrefier se confundă, practic, cu razele care trec prin centrul armăturii, adică într-un punct M din întrefier, cîmpul se reprezintă printr-un fazor H radial.

Dacă bobinajul ar fi concentrat în două crestături diametrale, cîmpul ar avea aproape aceeași valoare pe toată zona unui pol. Deoarece bobinajul este repartizat în crestături, liniile de forță ale cîmpului nu se mai repartizează uniform pe zona polului. Linia de cîmp care se închide prin dinții *3* și *4*, apropiați axei UV, este înlănțuită cu conductoarele unei singure crestături; liniile de cîmp care se închid prin dinții *2* și *5* sînt înlănțuite cu conductoarele din trei crestături și deci cîmpul va fi aproape de trei ori mai mare. La fel în dinții *1* și *6* cîmpul va fi mai mare de aproape cinci ori decît în dinții *3* și *4*)

Dacă se reprezintă periferia statorului prin dreapta $UNVSU$ (fig. 5.2. intensitatea cîmpului (luînd cîmpul polului nord ca pozitiv și neglijînd des-

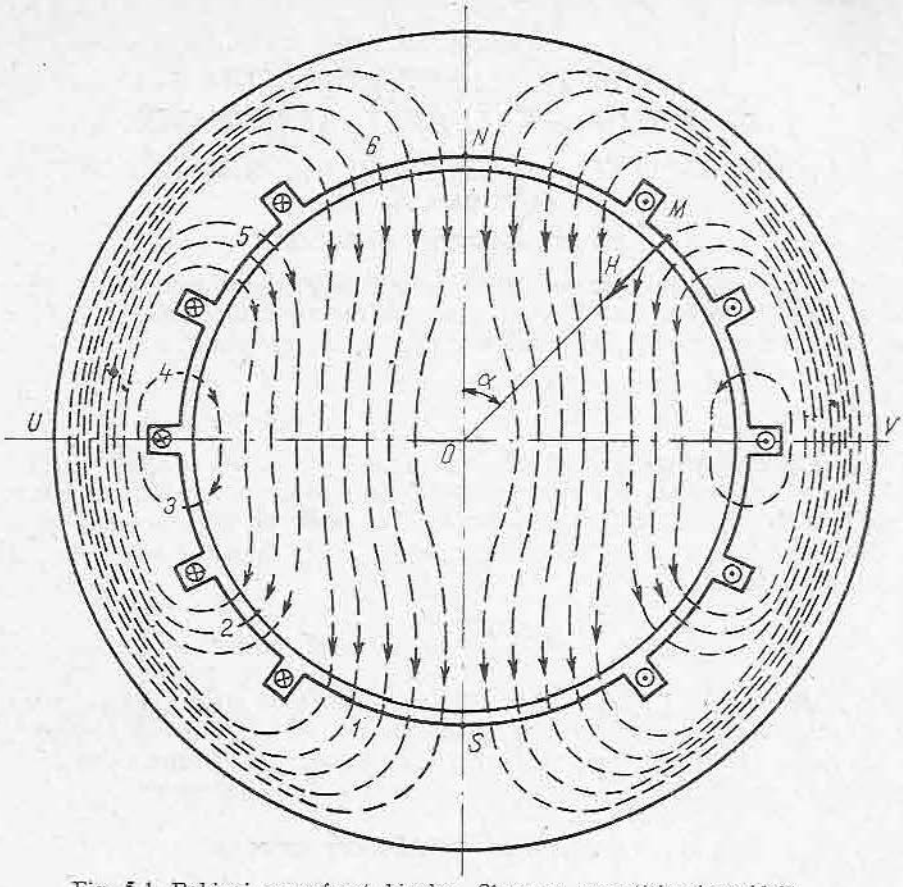


Fig. 5.1. Bobinaj monofazat bipolar. Cîmp cu repartiție sinusoidală.

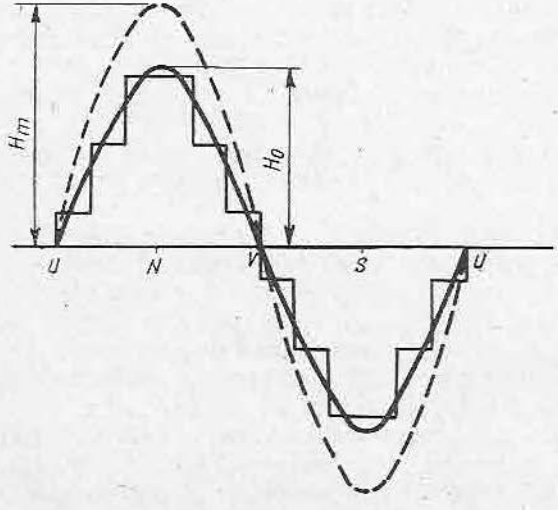


Fig. 5.2. Cîmpul cu repartiție sinusoidală în reprezentare desfășurată.

chiderea crestăturilor) are o variație în trepte de-a lungul întrefierului, variație apropiată de o sinusoidă (curba trasată cu linie continuă). Un asemenea cîmp se numește *cîmp cu repartiție sinusoidală în spațiu.*

Ținîndu-se seamă de cele arătate mai sus cu privire la repartiția sinusoidală a cîmpului, în punctul M din întrefier (a cărui poziție este definită de unghiul α făcut de raza variabilă OM cu raza fixă ON), intensitatea cîmpului se poate scrie:

$$H = H_0 \cos \widehat{NOM} = H_0 \cos \alpha, \tag{5.2}$$

în care H_0 este intensitatea în punctul N. Dacă curentul i este constant, cîmpul magnetic H este, de asemenea, constant în timp, în fiecare punct M, dar pentru diferite puncte M, el are o repartiție sinusoidală.

Un astfel de cîmp se numește *cîmp constant în timp cu repartiție sinusoidală.*

Dacă curentul i este alternativ, $i = I\sqrt{2} \cos \omega t$, intensitatea cîmpului în fiecare punct M variază sinusoidal în timp odată cu curentul. În acest caz, cîmpul magnetic se numește *cîmp alternativ cu repartiție sinusoidală.* În punctul N, intensitatea H_0 variază în funcție de timp, proporțional cu curentul i și în fază cu acest curent, deci:

$$H_0 = H_m \cos \omega t, \tag{5.3}$$

în care H_m este intensitatea maximă a cîmpului în punctul N.

Dacă se ține seama de relațiile (5.2) și (5.3), rezultă că în punctul M intensitatea cîmpului alternativ cu repartiția sinusoidală are expresia:

$$H = H_0 \cos \alpha = H_m \cos \omega t \cos \alpha. \tag{5.4}$$

În această relație, termenul $\cos \omega t$ arată variația sinusoidală în timp a cîmpului, iar termenul $\cos \alpha$ arată repartiția sa sinusoidală în spațiu (în întrefier).

3. CÎMPUL MAGNETIC MONOFAZAT MULTIPOLAR

Mașinile electrice se construiesc de obicei cu mai mult de doi poli.

În figura 5.3, *a* este reprezentată o mașină cu $2p = 6$ poli (sau cu $p = 3$ perechi de poli), la care curenții în conductoare formează p zone nord și p zone sud.

O zonă oarecare a bobinajului este văzută din centrul O sub unghiul $\frac{2\pi}{2p} = \frac{\pi}{p}$ numit *pas polar*; între doi poli N consecutivi sau poli S consecutivi există un unghi $2 \cdot \frac{2\pi}{2p} = \frac{2\pi}{p}$ egal cu dublul pas polar. Cîmpul astfel format este un cîmp multipolar. Acest cîmp este tot un cîmp cu repartiție sinusoidală reprezentat în figura 5.3, *b*.

Într-un punct M situat pe o rază OM care face cu ON_1 unghiul α, intensitatea cîmpului se scrie:

$$H = H_0 \cos p \widehat{N_1OM} = H_0 \cos p\alpha. \tag{5.5}$$

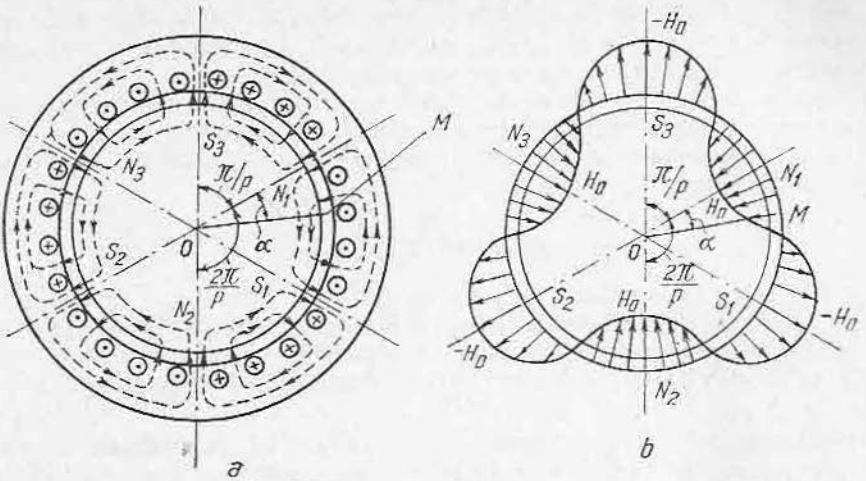


Fig. 5.3. Bobinaj monofazat cu 6 poli:
a — formarea zonelor polare; *b* — repartiția sinusoidală a cîmpului cu 6 poli.

Dacă curentul i este alternativ, intensitatea cîmpului H_0 în punctele N_1, N_2, N_3 variază după relația (5.3), deci cîmpul alternativ multipolar se va scrie:

$$H = H_m \cos \omega t \cos p\alpha. \tag{5.6}$$

Și în această relație, termenul $\cos \omega t$ indică variația sinusoidală în timp a cîmpului, iar termenul $\cos p\alpha$ indică o repartiție sinusoidală în spațiu, cu $2p$ poli.

B. NOȚIUNI GENERALE DESPRE ÎNFĂȘURĂRILE STATOARELOR MAȘINILOR DE CURENT ALTERNATIV

Spre deosebire de bobinajele de indus ale mașinilor de curent continuu, care sînt închise (începutul și sfîrșitul înfășurării sînt legate împreună la aceeași lamelă de colector), înfășurările de curent alternativ sînt deschise, în sensul că începutul și sfîrșitul înfășurării sînt legate la două borne separate fde la placa de borne.

Statorul mașinilor de curent alternativ este prevăzut cu crestături uniform repartizate, în care se introduc bobinele înfășurării. Dacă într-o crestătură se găsesc conductoare aparținînd unei singure bobine, bobinajul respectiv se numește *bobinaj într-un strat*, iar dacă într-o crestătură se găsesc conductoare aparținînd la două bobine diferite, bobinajul se numește *bobinaj în două straturi*.

Prin bobină se înțelege ansamblul de spire ale căror laturi se introduc în două crestături. Două sau mai multe bobine înseriate formează un grup de bobine. Înfășurarea unei faze poate avea una sau mai multe grupe de bobine, care se leagă în serie sau paralel, capetele înfășurării fazei respective rămînînd libere.

Condiția de realizare a unei înfășurări de curent alternativ a fost arătată în paragrafele precedente și anume, legăturile între conductoare trebuie

astfel făcute să se formeze $2p$ zone în care curenții în conductoare la un moment dat să aibă același sens, $2p$ fiind numărul polilor.

O mărime caracteristică înfășurărilor de curent alternativ este *numărul de crestături pe pol și fază* q, determinat cu relația:

$$q = \frac{Z}{2pm}, \tag{5.7}$$

în care: Z este numărul de crestături;
$2p$ — numărul de poli;
m — numărul de faze.

Cu cît q este mai mare, cu atît cîmpul produs de înfășurare se apropie mai mult de o sinusoidă.

În scopul de a apropia cît mai mult cîmpul produs de înfășurare de o sinusoidă, la bobinajele trifazate în două straturi, se utilizează un pas scurtat la bobinare cu una sau mai multe crestături.

C. ÎNFĂȘURĂRI MONOFAZATE

Înfășurările monofazate se execută de regulă într-un strat. În figura 5.4 este reprezentată frontal o înfășurare monofazată cu $2p = 2$. Statorul are 12 crestături, iar înfășurarea ocupă 2/3 din numărul de crestături, adică $\frac{2}{3} \cdot 12 =$ $= 8$ crestături. Numărul de crestături pe pol și fază este:

$$q = \frac{Z}{2pm} = \frac{8}{2 \cdot 1} = 4.$$

În figura 5.5 este reprezentată schema desfășurată a acestei înfășurări. Ea este formată din două grupe de bobine, fiecare grupă fiind formată din două bobine concentrice, înseriate fără întreruperea conductorului (înseriere notată pe figură cu m și p). Cele două grupe de bobine sînt înseriate între ele prin legătura n, însă bobinele puteau fi legate și în paralel.

Se constată că legăturile sînt astfel făcute încît se formează două zone de cîte q crestături, iar sensul curentului în zona crestăturilor *5, 6, 7, 8* este invers decît în zona crestăturilor *11, 12, 1, 2*, formîndu-se astfel $2p = 2$. Zona care corespunde unui pol se notează cu τ și se numește *pas polar*.

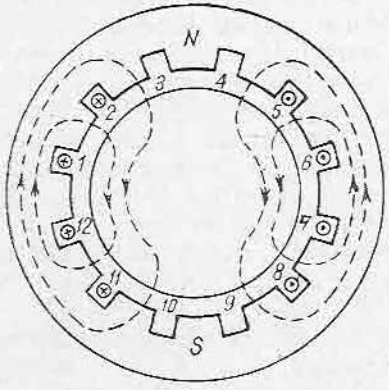


Fig. 5.4. Bobinaj monofazat bipolar (reprezentare frontală).

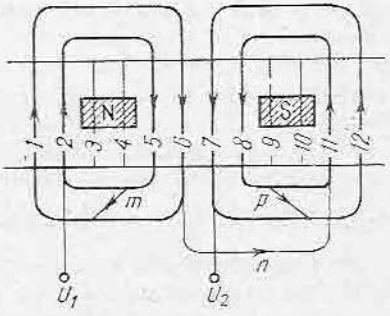


Fig. 5.5. Bobinajul din figura 5.4 în reprezentarea desfășurată.

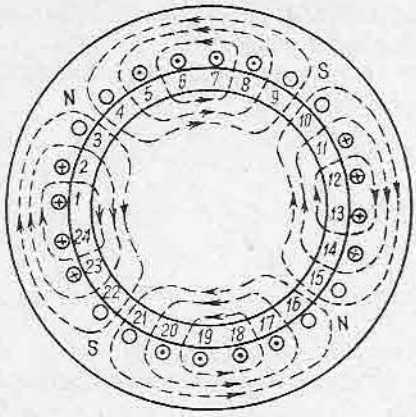


Fig. 5.6. Bobinaj monofazat cu patru poli (reprezentare frontală).

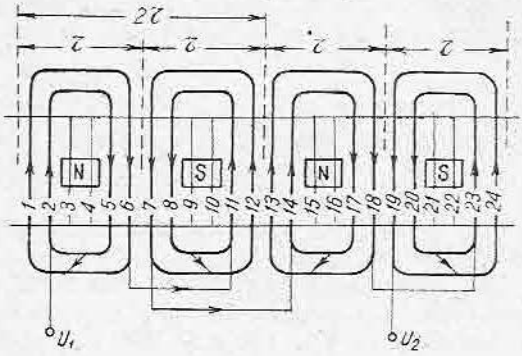


Fig. 5.7. Bobinajul din figura 5.6 în reprezentare desfășurată.

În figurile 5.6 și 5.7 este reprezentată o înfășurare monofazată cu $2p = 4$ poli și $Z = 24$ crestături, din care sînt bobinate $\frac{2}{3} \cdot 24 = 16$ crestături. Numărul de crestături pe pol și fază este:

$$q = \frac{Z}{2pm} = \frac{16}{4 \cdot 1} = 4.$$

Înfășurările din figurile 5.5 și 5.7 sînt într-un strat, deoarece într-o crestătură se introduc conductoare aparținînd unei aceleiași bobine. Capetele bobinelor nu se încrucișează și de aceea pot fi situate la același nivel sau etaj. De aceea aceste bobinaje se numesc *într-un strat*, cu capete de bobine într-un etaj.

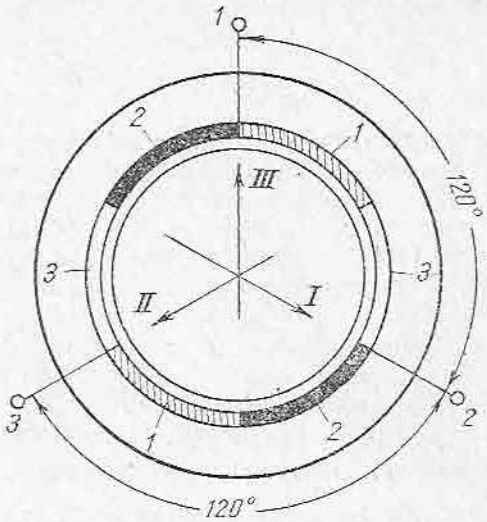
D. ÎNFĂȘURĂRI TRIFAZATE

Bobinajele trifazate se obțin în principiu așezînd pe aceeași armătură trei bobinaje monofazate identice, care devin faze ale bobinajului trifazat.

În figura 5.8 este arătată schema unui bobinaj trifazat bipolar. Fiecare fază este executată după regulile bobinajului monofazat bipolar cu deosebirea că o fază nu ocupă întreaga periferie a armăturii ci — în mod simetric — o fază ocupă a treia parte din periferie: cele două zone ocupate de faza *1* sînt reprezentate hașurat, cele ocupate de faza *2* — cu negru plin, iar cele ocupate de faza *3* — cu alb. Bobinajul are în total șase zone, cîte două pe fiecare fază. Trei zone consecutive formează pasul polar de 180°, iar toate cele șase zone formează dublul pas polar de 360°. Bornele de început ale fiecărei faze sînt marcate cu cifrele *1*, *2*, *3*. Aceste borne sînt decalate simetric pe periferie la 120° sau la două treimi din pasul polar, adică $\frac{2\tau}{3}$.

Se numește *sensul succesiunii fazelor* sensul în care, parcurgînd periferia, se întîlnesc începuturile fazelor în ordinea normală *1*, *2*, *3*; se observă însă că, în sensul succesiunii fazelor, conductoarele acestora sînt întîlnite în ordinea *1*, *3*, *2*.

Fig. 5.8. Bobinaj trifazat bipolar.



În schemele de bobinaj, fazele *1*, *2*, *3* sînt notate cu *U*, *V*, *W*.

În figura 5.9 este reprezentată schema desfășurată a unui bobinaj trifazat, avînd $Z = 24$ de crestături, $2p = 4$ poli, $m = 3$ faze. Numărul de cres-

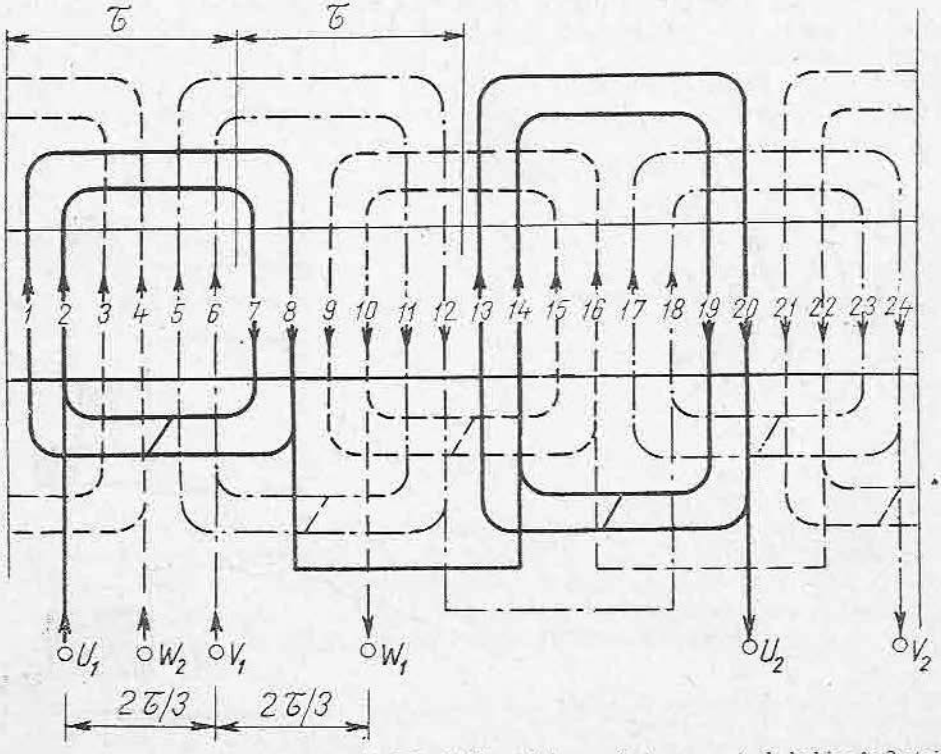


Fig. 5.9. Schema desfășurată a unui bobinaj trifazat într-un strat, cu capete de bobine în 2 etaje.

tături pe pol și fază este:

$$q = \frac{Z}{2pm} = \frac{24}{4 \cdot 3} = 2.$$

Pentru a observa formarea polilor, este necesar a se da sensuri curenților Convențional, sînt alese sensurile de curenți din momentul t_1 din figura 5.10 în care curenții în fazele *1* și *2* (adică U și V) sînt pozitivi, adică curenții circulă de la U_1 la U_2 și de la V_1 la V_2 iar în faza *3* curentul este negativ (adică curentul circulă de la W_2 la W_1). Este evident că pentru alt moment ales, sensurile curenților în una, două sau toate trei fazele se schimbă.

Notîndu-se sensurile de curenți în schema din figura 5.9, se constată formarea a patru zone cu același sens de curent, corespunzătoare celor patru poli. Pe fiecare pol se găsesc cîte două crestături din fiecare fază, deoarece $q = 2$. Intrările în înfășurare de la capetele $U_1 V_1 W_1$ se fac conform celor menționate anterior la $\frac{2\tau}{3}$. Fiecare fază este formată din două grupe de bobine, fiecare avînd două bobine concentrice. Capetele bobinelor se încrucișează și de aceea este necesar a fi situate la două nivele sau în două etaje.

Bobinajul din figura 5.9 este bobinaj într-un strat, cu capete de bobine în două etaje. Se execută și bobinaje cu capete de bobine în trei etaje. Aspectul capetelor de bobine în etaje este arătat în figura 5.11.

În practică sînt mai utilizate bobinajele în două straturi, care sînt mai ușor de executat și au avantajul că se pot realiza ușor bobinaje cu pas scurtat.

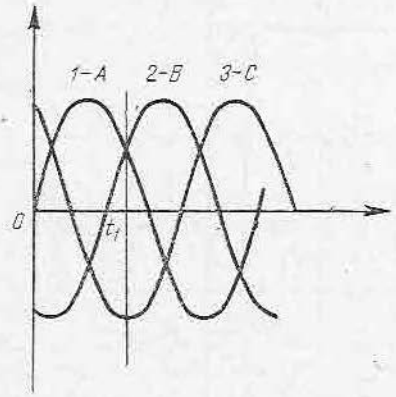


Fig. 5.10. Alegerea convențională a sensurilor curenților.

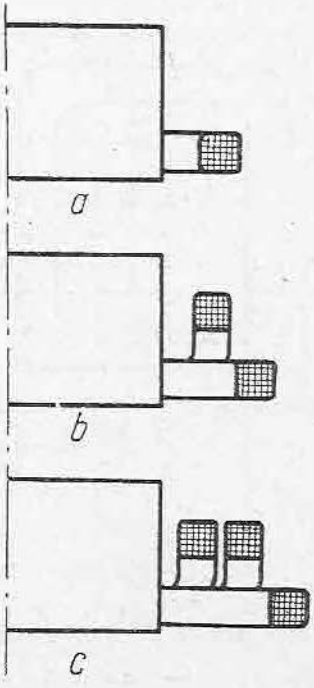


Fig. 5.11. Aspectul capetelor de bobină la bobinaje într-un strat:
a — cu 1 etaj; *b* — cu 2 etaje; *c* — cu 3 etaje.

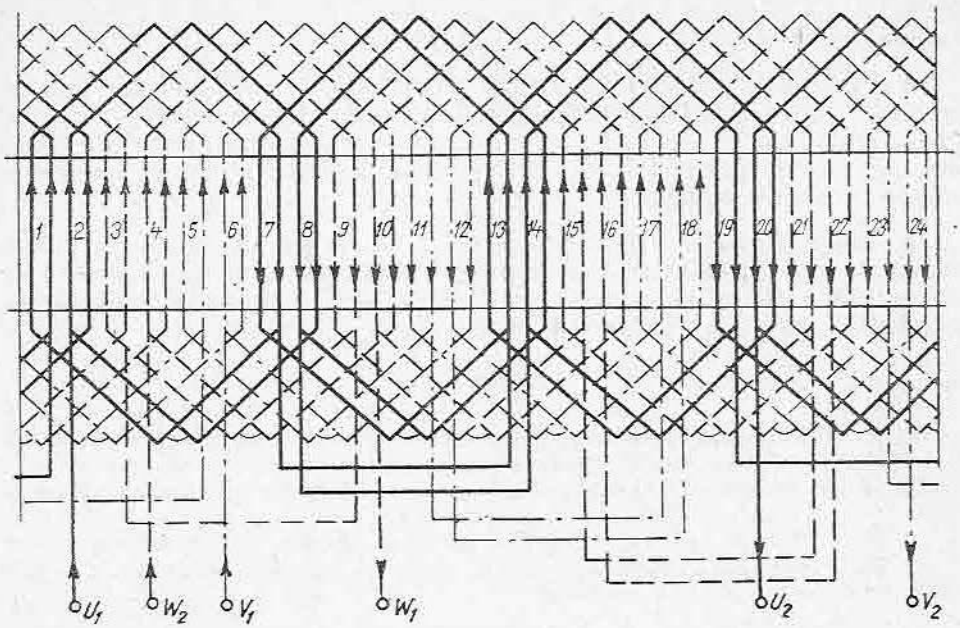


Fig. 5.12. Schema desfășurată a unui bobinaj trifazat în două straturi.

În figura 5.12 este reprezentat bobinajul trifazat în două straturi avînd $2p = 4$ și $q = 2$. Capetele de bobine formează o coroană și de aceea bobinajul se mai numește *cu capete în coroană*; în fiecare crestătură există laturi aparținînd la două bobine diferite. Pasul de bobinare al fiecărei bobine este:

$$y = \frac{Z}{2p} = \frac{24}{4} = 6$$

și este numit *pas diametral*. Prima bobină de exemplu este așezată cu laturile în crestătura 1 și în crestătura $1 + 6 = 7$. Un astfel de bobinaj se numește *bobinaj cu pas diametral*. Pentru a se realiza un cîmp magnetic mai apropiat de sinusoidă, în practică se execută bobinajele cu pas scurtat, adică în loc să se introducă bobina în crestăturile *1* și *7*, se introduce în crestăturile *1* și *6* sau *1* și *5*.

E. DEFECTE ȘI REMEDIERI

Defectele principale ale înfășurărilor de curent alternativ sînt:

● **Scurtcircuit între spire.** Se poate datora unei străpungeri a izolației conductorului sau unui defect din fabricație. Spirele scurtcircuitate aflîndu-se într-un cîmp alternativ se încălzesc puternic și se distruge izolația bobinei. Mașina cu un astfel de defect trebuie rebobinată total sau numai prin înlocuirea bobinei defecte.

● **Scurtcircuit între faze,** prin străpungerea izolației între faze, fie la capetele de bobine, fie în crestături la bobinajele în două straturi cu pas

scurtat. Defectul provoacă de regulă o topire locală a conductoarelor și de aceea mașina trebuie rebobinată.

● **Punerea la masă a bobinajului, prin străpungerea izolației față de masă.** De regulă acest defect are loc în zona porțiunilor introduse în crestături a bobinajelor. Uneori acest defect se poate remedia prin reparații locale, însă de cele mai multe ori la locul defectului se produce topirea spirelor și mașina trebuie rebobinată.

● **Legături greșite.** Dacă se leagă greșit fie un grup de bobine fie o fază întreagă, prin înseriere inversă, motorul pornește greu și face zgomot, iar curentul este inegal pe cele trei faze. Mașina trebuie demontată și refăcute legăturile corect după schema de bobinaj.

APLICAȚII

1. Să se întocmească schema unui bobinaj trifazat într-un strat cu capete de bobine în două etaje având $2p = 4$, $z = 36$ crestături.

2. Cu aceleași date ca la aplicația 1 să se întocmească schema unui bobinaj trifazat în două straturi cu pas diametral.

3. Să se întocmească schema unui bobinaj monofazat, având $Z = 36$ crestături și $2p = 4$.

4. Să se întocmească schema unui bobinaj trifazat în două straturi cu $2p = 4$, $z = 36$ crestături și pas scurtat cu o crestătură.

REZUMAT

1. Cîmpuri produse de o înfășurare monofazată multipolară:

— alimentată cu curent continuu, produce un cîmp constant în timp cu repartiție sinusoidală în întrefier:

$$H = H_0 \cos p\alpha;$$

— alimentată cu curent alternativ, produce un cîmp alternativ, cu repartiție sinusoidală în întrefier și o variație sinusoidală în timp:

$$H = H_m \cos p\alpha \cos \omega t.$$

2. Elementele înfășurărilor de curent alternativ:
Z — număr de crestături;
$2p$ — număr de poli;
m — număr de faze;

$q = \dfrac{Z}{2pm}$ — număr de crestături pe pol și fază.

3. Tipuri de bobinaje:

● După numărul de faze { — monofazat; — trifazat

● După sistemul de bobinare { bobinaje într-un strat { — cu capete de bobină într-un etaj; — cu capete de bobină în 2 etaje; — cu capete de bobină în 3 etaje; — cu capete de bobină în lanț } ; bobinaje în două straturi { — cu pas diametral; — cu pas scurtat }

Capitolul 6

CÎMPURILE MAGNETICE ÎNVÎRTITOARE ALE MAȘINILOR DE CURENT ALTERNATIV

A. CÎMPUL MAGNETIC ÎNVÎRTITOR AL UNEI ARMĂTURI MOBILE

Considerînd un magnet permanent (fig. 6.1) care se rotește în jurul unei axe O perpendiculare pe planul figurii, se obține un cîmp constant care se rotește cu o viteză unghiulară oarecare Ω. Un astfel de cîmp se numește *cîmp învîrtitor.*

În figura 6.2 este reprezentată o mașină, formată dintr-un stator cilindric în care se poate roti o armătură cu doi poli.

Bobinele rotorului sînt alimentate cu un curent continuu i. Presupunem mai întîi că armătura este fixă, în poziția din figură, în care axa polului nord trece prin punctul N_1 de pe stator. Conform celor arătate la subcapitolul 5.A, se formează un cîmp constant în timp, cu repartiție sinusoidală (presupunem că piesele polare realizează o astfel de repartiție). Într-un punct oarecare M, situat pe stator, la unghiul α_0 față de N_1 cîmpul are valoarea, conform relației (5.2):

$$H = H_0 \cos \alpha_0, \tag{6.1}$$

unde H_0 este intensitatea maximă a cîmpului din punctul N_1.

Presupunem că armătura începe să se rotească în sens trigonometric cu viteza unghiulară Ω. După timpul t, axa polului nord ajunge în dreptul punctului N_2 de pe stator. Deci, după timpul t, intensitatea maximă a cîmpului a ajuns în dreptul punctului N_2. Unghiul parcurs de armătură în timpul t este $\beta = \Omega t$ și deci unghiul pe care îl face raza fixă OM cu raza corespunzătoare cîmpului maxim, la timpul t, este $\alpha = \alpha_0 + \beta$.

Ca urmare, la timpul t, intensitatea cîmpului în punctul fix va fi:

$$H = H_0 \cos \alpha = H_0 \cos (\alpha_0 + \beta) = H_0 \cos (\alpha_0 + \Omega t). \tag{6.2}$$

Armătura continuînd să se rotească, în dreptul punctului M ajunge axa V, iar cîmpul devine nul $H = 0$, apoi ajunge axa polului S și cîmpul devine maxim în sens invers $H = -H_0$ ș.a.m.d. Deci, în dreptul punctului M, atunci cînd armătura mobilă se rotește, cîmpul este alternativ (conform relației 6.2).

Dacă armătura mobilă este multipolară, expresia cîmpului devine analog cu relația (5.5):

$$H = H_0 \cos p(\alpha_0 + \Omega t). \tag{6.3}$$

Dacă armătura se rotește în sens invers sensului trigonometric, rezultă că $\alpha = \alpha_0 - \beta = \alpha_0 - \Omega t$, iar expresia cîmpului în punctul fix M este:

$$H = H_0 \cos p(\alpha_0 - \Omega t). \tag{6.4}$$

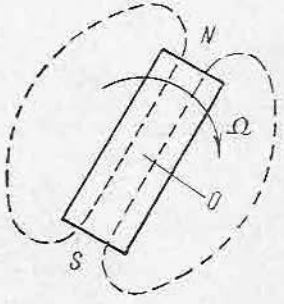


Fig. 6.1. Cîmp învîrtitor prin învîrtirea unui magnet permanent.

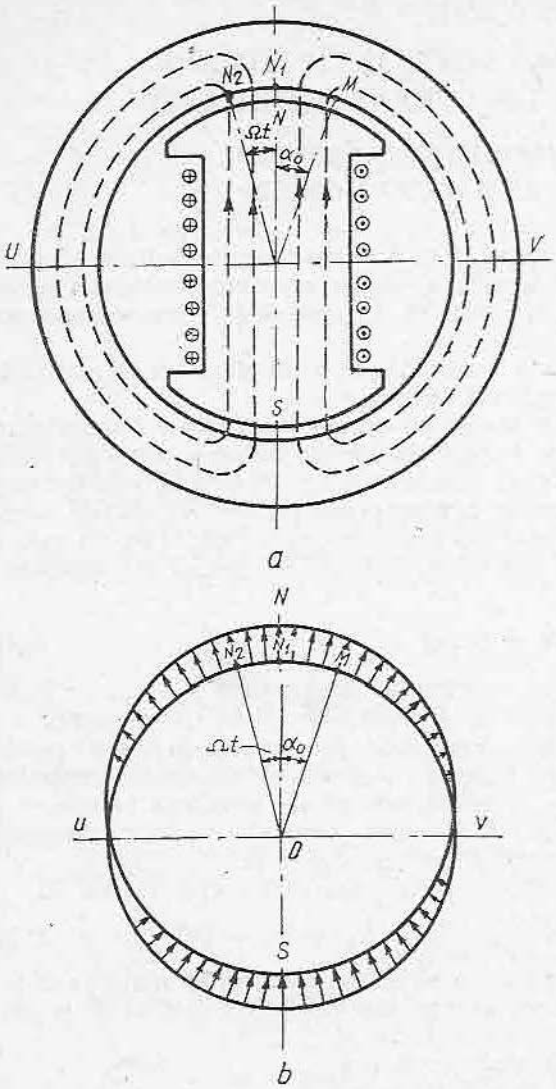


Fig. 6.2. Cîmp învîrtitor produs prin învîrtirea unei armături mobile bipolare:
a — schema mașinii cu armătură mobilă; *b* — reprezentarea grafică a repartiției cîmpului.

Reciproc, dacă într-un punct M fix al spațiului intensitatea cîmpului magnetic este dată de o relație de forma (6.3) sau (6.4), rezultă că cîmpul magnetic respectiv este un cîmp învîrtitor cu viteza unghiulară Ω.

B. CÎMPUL MAGNETIC ÎNVÎRTITOR AL UNEI ÎNFĂȘURĂRI MONOFAZATE

Se consideră un stator bobinat monofazat cu $2p$ poli, ca cel din figura 5.3. Dacă bobinajul este alimentat cu un curent alternativ, ia naștere un cîmp multipolar, cu o repartiție sinusoidală în spațiu și o variație sinusoidală în timp, avînd valoarea pentru un punct oarecare M conform relației (5.6):

$$H = H_m \cos \omega t \cos p\alpha.$$

Ținînd seama de identitatea trigonometrică $\cos a \cos b = \frac{1}{2}\cos(a+b) + \frac{1}{2}\cos(a-b)$, rezultă:

$$H = \frac{1}{2} H_m \cos(p\alpha + \omega t) + \frac{1}{2} H_m \cos(p\alpha - \omega t) = H_1 + H_2.$$

Deci cîmpul alternativ se descompune în două cîmpuri, cu intensitățile H_1 și H_2, date de relațiile:

$$H_1 = \frac{1}{2} H_m \cos(p\alpha + \omega t) = \frac{1}{2} H_m \cos p\left[\alpha + \frac{\omega}{p} t\right],$$
$$H_2 = \frac{1}{2} H_m \cos(p\alpha - \omega t) = \frac{1}{2} H_m \cos p\left[\alpha - \frac{\omega}{p} t\right]. \quad (6.5)$$

În consecință, cîmpul alternativ cu valoare maximă H_m și pulsație ω se descompune în două cîmpuri învîrtitoare de sens contrar, cu valoare maximă

$\frac{1}{2} H_m$ și cu viteza unghiulară $\Omega = \frac{\omega}{p}$. Totul se petrece ca și cum în locul armăturii fixe din figura 5.3 parcursă de curent alternativ, ar exista două armături care se rotesc în sens contrar, avînd bobinajele parcurse de curent continuu.

C. CÎMPUL MAGNETIC ÎNVÎRTITOR AL UNEI ÎNFĂȘURĂRI TRIFAZATE

La înfășurarea din figura 5.8 fiecare fază produce un cîmp alternativ cu repartiție sinusoidală; axele acestor cîmpuri, coincizînd cu axele bobinajelor fazelor respective, sînt marcate cu *I* pentru faza *1*, cu *II* pentru faza *2*, cu *III* pentru faza *3*. Fazele de bobinaj sînt parcurse de curenții i_1, i_2 și respectiv i_3, care formează un sistem simetric (fig. 6.3, *a* și *b*):

$$i_1 = I\sqrt{2}\cos\omega t; \quad i_2 = I\sqrt{2}\cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right);$$

$$i_3 = I\sqrt{2}\cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right).$$

Bobinajul astfel alimentat va produce un cîmp magnetic învîrtitor, în ordinea succesiunii fazelor.

În figura 6.3 se poate urmări producerea cîmpului magnetic învîrtitor produs de un bobinaj trifazat bipolar, la care fiecare fază este redusă, la cîte

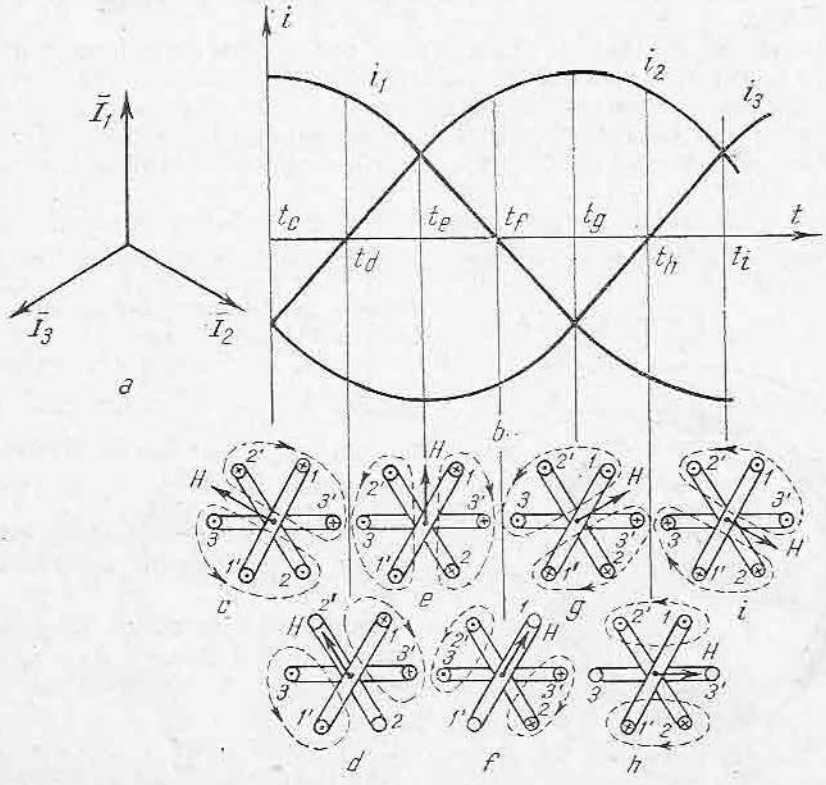


Fig. 6.3. Producerea cîmpului învîrtitor bipolar cu ajutorul unui bobinaj trifazat.

o singură spiră, formată de conductoarele *1 — 1'* pe faza *1*, conductoarele *2 — 2'* pe faza *2* și conductoarele *3 — 3'* pe faza *3* (fig. 6.3, *c*, *d*, *e*, ... *i*). Începuturile de fază sînt formate de conductoarele *1*, *2*, *3*, decalate cu 120°.

Se convine ca sens pozitiv al curentului sensul $\oplus$ în conductoarele *1*, *2*, *3* și sensul $\odot$ în conductoarele *1'*, *2'*, *3'*.

La momentul $t_c = 0$ (fig. 6.3, *b*), curentul i_1 este maxim și pozitiv, iar curenții i_2 și i_3 sînt egali, dar negativi. Acești curenți circulă prin conductoare după cum se arată în figura 6.3, *c*. Pe această figură se constată că ansamblul celor trei faze se comportă ca o singură bobină cu axa de simetrie coincizînd cu axa de simetrie a bobinei *1*. În consecință, cele trei faze vor produce un cîmp H bipolar, care în momentul t are axa după axa bobinei *1*.

La momentul t_d (fig. 6.3, *b*), curentul i_2 este nul, curentul i_1 este pozitiv, iar curentul i_3 negativ, dar în valoare absolută egal cu i_1. Sensul de circulație al curenților este indicat pe figura 6.3, *d*; ansamblul celor trei faze se comportă din nou ca o singură bobină, formată numai din conductoarele *1*, *3'* *1'* și *3*, cu axa de simetrie în planul bobinei *2*. Comparîndu-se figurile 6.3, *c* și 6.3, *d* se constată că în intervalul de timp $t_c \dots t_d$ egal cu 1/12 din perioada T a curentului, axa cîmpului magnetic s-a rotit cu 1/12 din unghiul la centru, în sensul succesiunii fazelor.

Considerîndu-se în mod analog momentele t_e, t_f, t_g etc., se confirmă concluzia de mai sus. În întreaga perioadă T, axa cîmpului va face o rotație completă în sensul succesiunii fazelor, ajungînd din nou în poziția inițială din figura 6.3, *c*.

În concluzie, bobinajul trifazat bipolar produce un cîmp bipolar învîrtitor, care se rotește în sensul succesiunii fazelor, făcînd o rotație completă într-o perioadă T a curentului alternativ.

Pentru a găsi expresia cîmpului învîrtitor produs de un bobinaj trifazat multipolar, se va urmări în figura 6.4 schema unui bobinaj trifazat multipolar, cu $2p = 6$ poli.

Fiecare fază este un bobinaj monofazat, cu $2p$ poli (cu $2p$ zone), ocupînd însă numai $\frac{1}{3}$ din periferia armăturii. Deoarece fiecare fază are conductoarele așezate în $2p$ zone, bobinajul are în total $3 \cdot 2\ p = 6\ p$ zone.

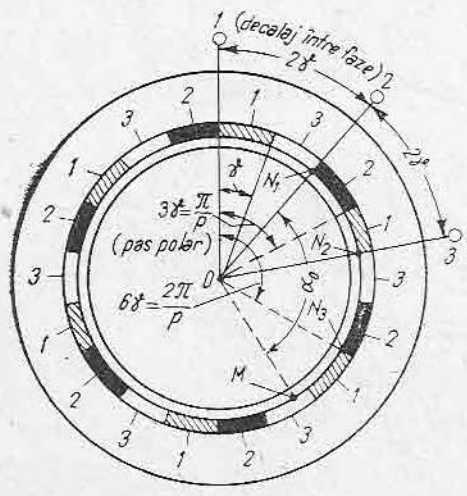


Fig. 6.4. Bobinaj trifazat cu 6 poli.

O zonă este văzută din centru sub unghiul $\gamma = \frac{2\pi}{6p} = \frac{\pi}{3p}$, un pas polar sub unghiul 3γ, iar decalajul între faze sub unghiul $2\gamma = \frac{2\pi}{3p}$.

Fiecare fază a bobinajului produc cîte un cîmp alternativ monofazat cu 2 poli.

Pe figură sînt notați cîte un pol nord ai fiecărei faze, cu N_1, N_2 și N_3 decalați între ei cu unghiul geometric $2\gamma = \frac{2\pi}{3p}$.

Notînd cu H_{01}, H_{02}, H_{03}, intensitatea cîmpului la un moment t, în dreptul

polilor N_1, N_2, N_3 și ținîndu-se seama de relația (5.5), rezultă că într-un punct oarecare M din întrefier, cele trei faze produc cîmpuri cu intensitățile:

$$H_1 = H_{01}\cos p\alpha_0;\quad H_2 = H_{02}\cos p\left(\alpha_0 - \frac{2\pi}{3p}\right) = H_{02}\cos\left(p\alpha_0 - \frac{2\pi}{3}\right);$$

$$H_3 = H_{03}\cos p\left(\alpha_0 - \frac{4\pi}{3p}\right) = H_{03}\cos\left(p\alpha_0 - \frac{4\pi}{3}\right). \qquad (6.6)$$

Intensitatea cîmpului în punctele N_1, N_2, N_3 este proporțională și în fază cu curenții i_1, i_2 și i_3 din relația (6.5) care produc aceste cîmpuri, adică:

$$H_{01} = H_m\cos\omega t;\quad H_{02} = H_m\cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right);$$

$$H_{03} = H_m\cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right).$$

Cu aceasta, relațiile (6.6) devin:

$$H_1 = H_m\cos\omega t\cos p\alpha_0 = \frac{1}{2}H_m\cos(p\alpha_0 + \omega t) + \frac{1}{2}H_m\cos(p\alpha_0 - \omega t);$$

$$H_2 = H_m\cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)\cos\left(p\alpha_0 - \frac{2\pi}{3}\right) = \frac{1}{2}H_m\cos\left(p\alpha_0 + \omega t - \frac{4\pi}{3}\right) +$$

$$+\frac{1}{2}H_m\cos(p\alpha_0 - \omega t);$$

$$H_3 = H_m\cos\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)\cos\left(p\alpha_0 - \frac{4\pi}{3}\right) = \frac{1}{2}H_m\cos\left(p\alpha_0 + \omega t - \frac{8\pi}{3}\right) +$$

$$+\frac{1}{2}H_m\cos(p\alpha_0 - \omega t).$$

Adunînd relațiile precedente membru cu membru și ținînd seamă că $H_1 + H_2 + H_3$ este intensitatea H a cîmpului rezultant în punctul M, rezultă:

$$H = H_1 + H_2 + H_3 = \frac{3}{2}H_m\cos(p\alpha_0 - \omega t) + \frac{1}{2}H_m\cos(p\alpha_0 + \omega t) +$$

$$+\frac{1}{2}H_m\cos\left(p\alpha_0 + \omega t - \frac{4\pi}{3}\right) + \frac{1}{2}H_m\cos\left(p\alpha_0 + \omega t - \frac{8\pi}{3}\right).$$

Ultimii trei termeni din relația de mai sus reprezintă suma a trei mărimi sinusoidale simetrice, cu aceeași amplitudine $\frac{1}{2}H_m$ și defazate în urmă cu $\frac{4\pi}{3}$ sau înainte cu $\frac{2\pi}{3}$, deci suma lor este nulă. În consecință, cîmpul rezultant în punctul fix M se poate scrie:

$$H = \frac{3}{2}H_m\cos(p\alpha_0 - \omega t) = \frac{3}{2}H_m\cos p\left(\alpha_0 - \frac{\omega}{p}t\right). \qquad (6.7)$$

Comparînd această relație cu relația (6.4), reiese că cîmpul rezultant produs de un bobinaj trifazat cu p perechi de poli este un cîmp învîrtitor cu intensi-

tatea maximă $\frac{3}{2} H_m$, care se rotește în sens invers trigonometric, adică în sensul succesiunii fazelor, cu viteza unghiulară:

$$\Omega = \frac{\omega}{p}. \tag{6.8}$$

Pentru a schimba sensul rotației cîmpului este necesar să se inverseze sensul succesiunii fazelor, astfel încît, de exemplu, curentul i_2 să circule prin faza notată cu *3*, iar curentul i_3 prin faza notată cu *2*. Pentru aceasta este necesar să se inverseze între ele legăturile la rețea a două din fazele bobinajului.

D. TENSIUNEA ELECTROMOTOARE INDUSĂ ÎN ÎNFĂȘURĂRILE DE CURENT ALTERNATIV

Din paragrafele precedente se poate trage concluzia că expresia generală a unui cîmp învîrtitor, indiferent dacă este creat de o armătură mobilă sau de o înfășurare fixă este:

$$H = H_m \cos p(\alpha_e \pm \Omega t), \tag{6.9}$$

în care Ω este viteza unghiulară a cîmpului învîrtitor, iar semnul $\pm$ indică sensul de rotație al cîmpului.

Într-un punct M aflat pe armătura fixă, la unghiul α_0 față de axa unui pol nord, la $t = 0$, cîmpul, conform acestei relații, este alternativ, cu pulsația $\omega = p\Omega$.

Alegînd ca origine de fază (poziția punctului M la timpul $t = 0$) unghiul $p\alpha_0 = \frac{\pi}{2}$, expresia cîmpului devine:

$$H = H_m \sin p\Omega t = H_m \sin \omega t. \tag{6.10}$$

Se atrage atenția că în timp ce α_0 este un unghi geometric (unghiul la centrul statorului ale cărui laturi trec prin punctul M și axa polului nord la timpul $t = 0$), unghiul $p\alpha_0 = \frac{\pi}{2}$ este un unghi electric al cîmpului alternativ cu pulsația ω, deci:

$$p \cdot \textit{unghiul geometric} = \textit{unghiul electric}.$$

Ținînd seama că inducția magnetică în întrefier este $B = \mu H$, expresia inducției în întrefier este:

$$B_\delta = B_{\delta m} \sin \omega t, \tag{6.11}$$

în care $B_{\delta m}$ este inducția maximă $B_{\delta m} = \mu H_m$.

1. T.E.M. INDUSĂ ÎN CÎMPUL MAGNETIC ÎNVÎRTITOR AL UNEI ARMĂTURI MOBILE ÎNTR-O ÎNFĂȘURARE MONOFAZATĂ

Se consideră o armătură mobilă cu $2p$ poli, avînd bobine de excitație alimentate cu curent continuu i.

Armătura se rotește cu turația n, deci cu viteza unghiulară $\Omega = \frac{2\pi n}{60}$. Conform celor arătate anterior, armătura va produce un cîmp învîrtitor, cu inducția în întrefier:

$$B_\delta = B_{\delta m} \sin \omega t, \tag{6.11}$$

mărime alternativă cu pulsația $\omega = p\Omega$.

Se presupune că piesele polare sînt astfel construite încît asigură o formă sinusoidală a cîmpului.

Se consideră că pe armătura fixă există o înfășurare monofazată, cu $2p$ poli și $q = 1$, adică o singură crestătură de pol, și cu numărul total de conductoare egal cu N, care formează $w = \frac{N}{2}$ spire, bobinate cu pasul diametral τ.

Polii cîmpului învîrtitor trec succesiv prin fața spirelor de pe armătura fixă, astfel încît spirele sînt străbătute de un flux magnetic alternativ, variind odată cu inducția și are expresia:

$$\varphi = \Phi_m \sin \omega t. \tag{6.12}$$

Valoarea fluxului maxim Φ_m se poate afla din relația:

$$\Phi_m = B_{\delta\, mediu} S = L\tau B_{\delta\, mediu}$$

în care: L este lungimea pachetului de tole;
τ — pasul polar;
S — suprafața corespunzătoare unui pol;
$B_{\delta\, mediu}$ — inducția medie în întrefier.

În figura 6.5 este reprezentat cîmpul corespunzător unui pol, avînd inducția maximă $B_{\delta m}$. Construind un dreptunghi cu aria egală cu aria dintre curba cîmpului și axa de referință, înălțimea acestui dreptunghi reprezintă inducția medie $B_{\delta\, mediu}$. Se poate demonstra că în cazul unei repartiții sinusoidale în spațiu a cîmpului, inducția medie este:

$$B_{\delta\, mediu} = \frac{2B_{\delta m}}{\pi}.$$

Conform legii inducției electromagnetice, în spirele străbătute de fluxul alternativ φ, se induce o t.e.m.:

$$e = -w \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}.$$

Conform celor arătate la subcapitolul 2.F:

$$e = -w\Phi_m \cos \omega t = w\Phi_m \omega \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right). \tag{6.13}$$

T.e.m indusă este deci alternativă sinusoidală, cu aceeași pulsație ca și cîmpul învîrtitor și defazată în timp în urma fluxului cu unghiul $\frac{\pi}{2}$.

Valoarea eficace este:

$$E = \frac{w\Phi_m \omega}{\sqrt{2}} = \frac{w\Phi_m 2\pi f}{\sqrt{2}} = \\ = 4{,}44 f W \Phi_m \tag{6.14}$$

adică o relație identică cu cea găsită la teoria transformatorului.

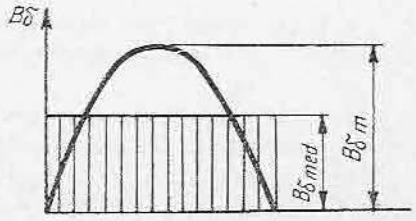


Fig. 6.5. Inducția medie în întrefier.

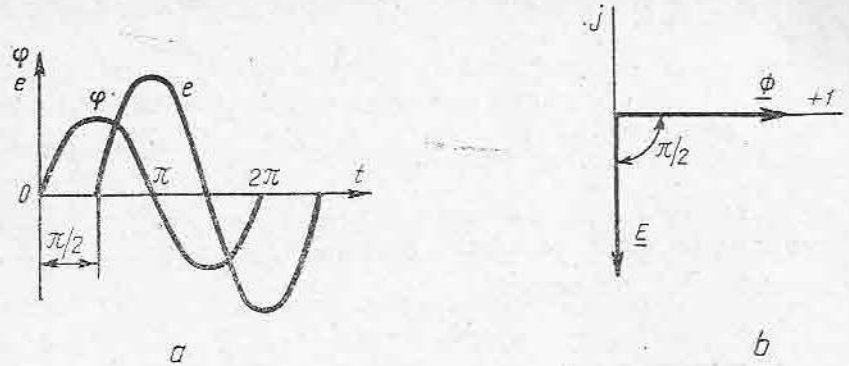


Fig. 6.6. Reprezentarea grafică a fluxului inductor și a t.e.m. induse:
a — reprezentare carteziană; *b* — diagrama de fazori.

Reprezentarea grafică a fluxului inductor și a t.e.m. induse este arătată în figura 6.6.

Frecvența t.e.m. indusă este:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{p\Omega}{2\pi} = \frac{p\frac{2\pi n}{60}}{2\pi} = \frac{pn}{60}. \tag{6.15}$$

Relația (6.14) este valabilă numai pentru cazul considerat cînd pe fiecare pol există o singură crestătură, iar pasul este diametral și deci toate spirele înfășurării ocupă simultan aceeași poziție în cîmp.

Dacă înfășurarea are mai multe crestături pe pol (acesta fiind cazul real în practică), spirele nu mai ocupă simultan aceeași poziție în cîmp și deci t.e.m. induse în spirele aflate în crestături diferite sînt defazate între ele și nu se mai însumează aritmetic, ci fazorial. Din această cauză, valoarea eficace a t.e.m. induse trebuie raportată prin înmulțirea cu k_q, numit și *factor de zonă*.

Scurtarea pasului de bobinaj, provoacă de asemenea o micșorare a fluxului inductor ce străbate spirele și de aceea valoarea t.e.m. induse trebuie raportată prin înmulțire cu k_s, numit *factorul de scurtare*.

Notînd cu $k_w = k_q k_s$ factorul de bobinaj, atunci valoarea eficace a t.e.m. induse devine:

$$E = 4{,}44\ k_w f w \Phi_m. \tag{6.16}$$

2. T.E.M. INDUSĂ DE CÎMPUL MAGNETIC ÎNVÎRTITOR AL UNEI ARMĂTURI MOBILE ÎNTR-O ÎNFĂȘURARE TRIFAZATĂ

În cazul precedent, să considerăm că statorul este prevăzut cu o înfășurare trifazată cu $2p$ poli (același număr de poli ca la armătura mobilă).

Dacă armătura mobilă se rotește în sensul succesiunii fazelor, adică *1, 2, 3* (sau *U, V, W*) în fiecare fază se induce o t.e.m. cu valoarea eficace dată de relația (6.16), însă din cauza decalajului dintre faze, t.e.m. sînt și

ele defazate. Unghiul geometric de decalaj a înfășurărilor fazelor, pe periferia statorului este:

$$\frac{2\tau}{3} = \frac{2\frac{2\pi}{2p}}{3} = \frac{2\pi}{3p},$$

iar unghiul electric de defazaj între tensiunile induse în cele trei faze este:

$$\dot{p} = \frac{2\pi}{3p} = \frac{2\pi}{3},$$

adică 120° electrice.

Dacă se ia ca origine de fază faza fluxului φ, expresiile celor trei tensiuni electromotoare induse în cele trei faze și care formează un sistem simetric de tensiuni sînt:

$$\begin{aligned} e_1 &= E\sqrt{2}\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right); \\ e_2 &= E\sqrt{2}\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{3}\right); \\ e_3 &= E\sqrt{2}\sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2} - \frac{4\pi}{3}\right). \end{aligned} \tag{6.17}$$

3. T.E.M. INDUSĂ DE UN CÎMP ÎNVÎRTITOR CU VITEZA UNGHIULARĂ Ω_0, ÎNTR-O ÎNFĂȘURARE AFLATĂ PE O ARMĂTURĂ CE SE ROTEȘTE ÎN SENSUL CÎMPULUI ÎNVÎRTITOR CU VITEZA UNGHIULARĂ Ω

Se consideră un stator cu o înfășurare trifazată cu $2p$ poli, care produce un cîmp învîrtitor, cu viteza $\Omega_0 = \frac{\omega_1}{p}$. Pe rotor se găsește o altă înfășurare trifazată cu același număr de poli, iar rotorul se rotește în sensul cîmpului cu viteza Ω. Pulsația t.e.m. induse în rotor va depinde de viteza relativă între cîmpul învîrtitor și spirele înfășurării rotorului și deci va fi:

$$\omega_2 = p(\Omega_0 - \Omega). \tag{6.18}$$

În înfășurarea rotorului se induce un sistem simetric de tensiuni, cu pulsația ω_2 și valoarea eficace:

$$E = 4{,}44\, k_{w2} f_2 w_2 \Phi_m, \tag{6.19}$$

în care

$$f_2 = \frac{\omega_2}{2\pi}. \tag{6.20}$$

Expresiile valorilor instantanee ale t.e.m. induse sînt similare cu relațiile (6.17), însă în loc de ω, pulsația este ω_2.

E. REACȚIA INDUSULUI

Cînd mașina de curent alternativ funcționează în sarcină, bobinajul indus este parcurs de un curent alternativ, producînd un flux magnetic propriu de reacție, care se compune cu fluxul inductor, dînd un flux rezultant care produce tensiunea electromotoare în sarcină.

În cazul studiat mai înainte la punctul 3, dacă înfășurarea indusului este închisă (legată de exemplu în triunghi), prin înfășurare va circula un sistem trifazat de curenți, defazați în urma t.e.m. pe fază cu un unghi φ_2. Acest sistem de curenți trifazați vor produce un cîmp învîrtitor față de armătura respectivă (rotorul), cu viteza unghiulară:

$$\Omega_2 = \frac{\omega_2}{p}$$

în sensul succesiunii fazelor din rotor, care este același cu sensul de rotație.

Față de stator, acest cîmp învîrtitor de rotație are viteza unghiulară egală cu suma vitezelor cîmpului față de rotor și a rotorului față de stator, adică:

$$\Omega_2 + \Omega = \frac{\omega_2}{p} + \Omega.$$

Eliminînd pe ω_2 cu ajutorul relației (6.18) rezultă:

$$\Omega_2 + \Omega = \frac{p(\Omega_0 - \Omega)}{p} + \Omega = \Omega_0.$$

Deci, viteza cîmpului de reacție este independentă de viteza rotorului și este egală cu viteza cîmpului inductor. Cele două cîmpuri învîrtitoare se rotesc cu aceeași viteză Ω_0, însă sînt defazate între ele. Ele se compun dînd naștere unui cîmp rezultant. Cîmpul rezultant este cel care induce la mersul în sarcină, t.e.m. în înfășurări.

APLICAȚII ȘI PROBLEME

1. O armătură mobilă cu $2p = 8$ poli, se rotește cu viteza de rotație de 3 000 rot/min. Să se calculeze frecvența t.e.m. induse în înfășurarea statorului.
Răspuns: $f = 200$ Hz.

2. Să se calculeze viteza de rotație n (rot/min) a cîmpului învîrtitor produs de o înfășurare trifazată cu $2p = 6$, alimentată de la o rețea cu frecvența de 50 Hz.
Răspuns: $n = 1\,000$ rot/min.

3. Să se reprezinte diagrama fazorială a sistemului simetric de tensiuni induse într-o înfășurare trifazată.

Răspuns: se ia ca origine de fază E_1, apoi se reprezintă E_2 defazat în urmă cu $\frac{2\pi}{3}$ și apoi E_3 defazat în urma lui E_2 cu $\frac{2\pi}{3}$.

REZUMAT

1. Cîmpul învîrtitor al unei armături mobile.

● Roata polară cu $2p$ poli se rotește cu turația n (rot/min), deci cu viteza unghiulară $\Omega = \frac{2\pi m}{60}$ rad/s.

● Expresia cîmpului învîrtitor este:

$$H = H_m \cos (p\alpha_0 \pm p\Omega t) = H_m \cos (p\alpha_0 \pm \omega t),$$

în care:

H este cîmpul într-un punct M aflat la unghiul geometric α_0 față de axa unui pol nord;

$p\alpha_0$ — unghiul electric care arată originea de fază (semnele $\pm$ arată sensul de rotație).

2. Cîmpul magnetic al unei înfășurări monofazate

$$H = H_m \cos p\alpha \cos \omega t$$

se poate descompune în două cîmpuri învîrtitoare în sensuri opuse

$$H_1 = \frac{1}{2} H_m \cos p \left(\alpha + \frac{\omega}{p} t\right);$$

$$H_2 = \frac{1}{2} H_m \cos p \left(\alpha - \frac{\omega}{p} t\right).$$

3. Cîmpul magnetic învîrtitor al unei înfășurări trifazate, prin care circulă un sistem trifazat de curenți

$$i_1 = I\sqrt{2} \cos \omega t; \; i_2 = I\sqrt{2} \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right);$$

$$i_3 = I\sqrt{2} \cos \left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)$$

este:

$$H = \frac{3}{2} H_m \cos p \left(\alpha_0 - \frac{\omega}{p} t\right).$$

4. T.e.m. indusă de cîmpul magnetic învîrtitor al unei armături mobile într-o înfășurare monofazată.

● Expresia cîmpului învîrtitor și inducției în întrefier luînd ca origine de fază axa neutră $\left(p\alpha_0 = \frac{\pi}{2}\right)$ este:

$$H = H_m \sin \omega t;$$

$$B_\delta = B_{\delta m} \sin \omega t.$$

● Expresia fluxului care străbate spira este:

$$\varphi = \Phi_m \sin \omega t.$$

în care $\Phi_m = L\tau B_{mediu}$.

● T.e.m. indusă:

$$e = E \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

este alternativă sinusoidală avînd:

— valoarea eficace $E = 4{,}44\ k_w f w \Phi_m$

— defazajul față de flux $\frac{\pi}{2}$ în urmă

— pulsația $\omega = p\Omega$ în care $\Omega = \frac{2\pi n}{60}$

— frecvența $f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{pn}{60}$

$k_w = k_q k_s$ — factorul de bobinaj, în care:
k_q — factor de zonă (din cauza repartizării în crestături);
k_s — factor de scurtare (din cauza scurtării pasului).

5. T.e.m. induse într-o înfășurare trifazată:

$$e_1 = E\sqrt{2}\ \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right);$$

$$e_2 = E\sqrt{2}\ \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{3}\right);$$

$$e_3 = E\sqrt{2}\ \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2} - \frac{4\pi}{3}\right).$$

6. T.e.m. indusă de un cîmp învîrtitor cu viteza Ω_0, într-o înfășurare aflată pe o armătură mobilă ce se rotește în același sens cu viteza Ω:

$$E = 4{,}44\ k_{w2} f_2 w_2 \Phi_m$$

în care:

$$\omega_2 = p(\Omega_0 - \Omega)$$

$$f_2 = \frac{\omega_2}{2\pi}$$

Capitolul 7

MAȘINI ELECTRICE ASINCRONE

A. ELEMENTE CONSTRUCTIVE DE BAZĂ

Mașinile electrice asincrone sînt caracterizate prin faptul că au viteza de rotație puțin diferită de viteza cîmpului învîrtitor, de unde și numele de asincrone. Ele pot funcționa în regim de motor, în regim de generator sau în regim de frînă.

Cea mai largă utilizare o au ca motoare electrice, fiind preferate față de celelalte tipuri de motoare, prin construcția mai simplă și siguranța în exploatare.

Ca orice mașină rotativă, mașinile asincrone au un stator, care este inductorul, și un rotor (indusul), separate de un întrefier.

După modul de realizare a înfășurării indusului, există două tipuri principale de mașini asincrone:

— *mașini asincrone cu rotorul bobinat și cu inele colectoare* (pe scurt, mașini asincrone cu inele);

— *mașini asincrone cu rotorul în scurtcircuit.*

Părțile principale ale unei mașini asincrone sînt: statorul, rotorul, portperiile (numai la mașinile cu inele), scuturile, lagărele, cutia de borne etc. (fig. 7.1).

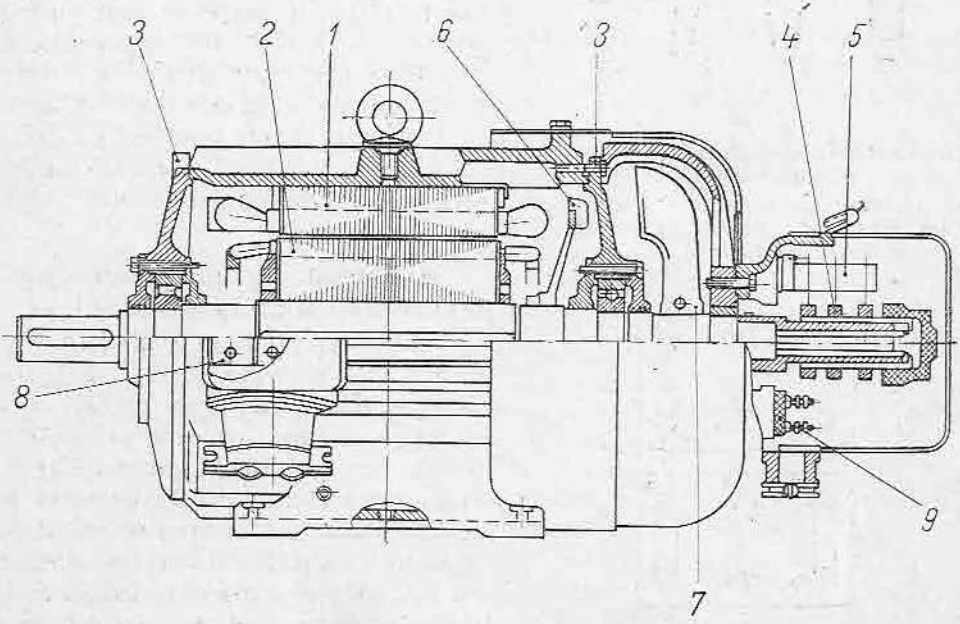


Fig. 7.1. Secțiune printr-o mașină asincronă cu inele colectoare:
1 — stator; *2* — rotor; *3* — scuturi; *4* — inele; *5* — portperii; *6* — ventilator interior; *7* — ventilator exterior; *8* — placa de borne a statorului; *9* — placa de borne a rotorului.

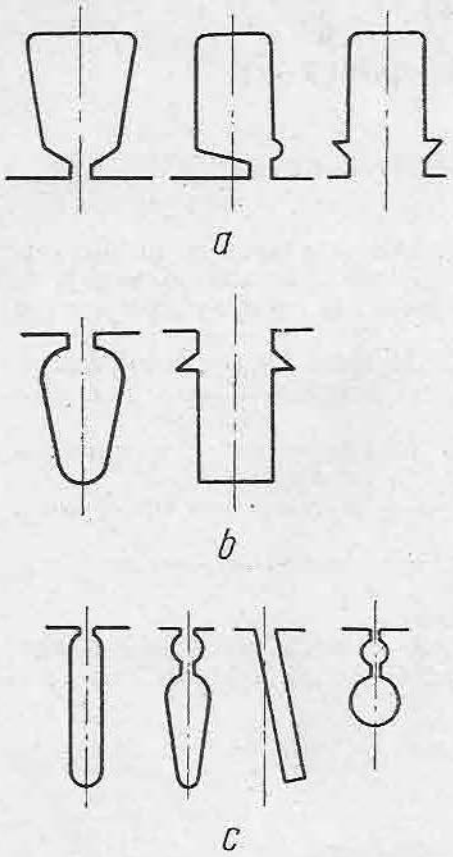


Fig. 7.2. Formele principale ale crestăturilor mașinilor asincrone:
a — crestături de stator; *b* — crestături de rotor bobinat; *c* — crestături de rotor în scurtcircuit.

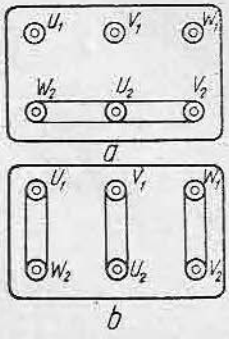


Fig. 7.3. Legarea bornelor la conexiune:
a — stea; *b* — triunghi.

● **Statorul** produce cîmpul magnetic învîrtitor și este format din carcasă, pachetul de tole și înfășurarea statorului.

— *Carcasa* se execută din fontă, din oțel sudat sau la mașini mici din aliaje de aluminiu.

— *Pachetul de tole* este de formă cilindrică, cu crestături la partea interioară. Se execută din tablă silicioasă, laminată la cald sau la rece, cu grosimea de 0,5 mm.

În figura 7.2, *a* sînt indicate formele principale ale crestăturilor din tola statorului.

— *Înfășurarea statorului* poate fi monofazată sau trifazată, într-un strat sau în două straturi, conform celor arătate la cap. 5.

Capetele înfășurării statorului sînt legate la o placă de borne. Înfășurarea mașinilor trifazate poate fi legată în stea sau în triunghi. Conexiunea poate fi executată la înfășurare, în care caz la placa de borne se scot numai trei capete U, V, W, sau poate fi executată prin montarea unor barete la placa de borne, în care caz la aceasta se scot șase capete notate U_1, V_1, W_1, U_2, V_2, W_2. În figura 7.3 se arată modul de legare a bornelor pentru conexiunea stea sau triunghi.

● **Rotorul,** după tipul mașinii, poate fi cu inele sau în scurtcircuit.

— *Rotorul cu inele* (fig. 7.1) este format din arborele de oțel, pe care este împachetat pachetul de tole prevăzut cu crestături la exterior, a căror formă este arătată în figura 7.2, *b*. Înfășurarea indusului este trifazată și realizată din conductoare izolate, introduse în crestăturile rotorului, similar cu înfășurarea statorului. Înfășurarea rotorului se leagă în stea, iar cele trei capete se scot printr-o gaură practicată axial în arbore, la capătul unde

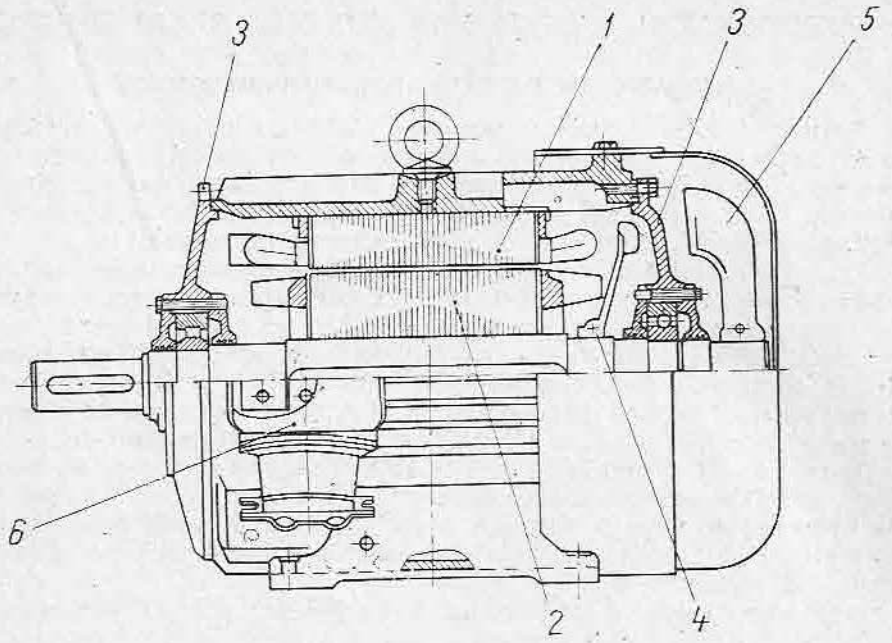


Fig. 7.4. Secțiune printr-o mașină asincronă în scurtcircuit:
1 — stator; *2* — rotor; *3* — scuturi; *4* — ventilator interior; *5* — ventilator exterior; *6* — cutie de borne.

este montat subansamblul inele colectoare. Acesta are trei inele, executate din bronz, alamă sau oțel, izolate între ele, și montate strîns pe un butuc izolat. La fiecare inel se leagă unul din capetele înfășurării rotorului, legată în stea.

— *Rotorul în scurtcircuit* (fig. 7.4) este format din arbore, pachetul de tole prevăzut cu crestături a căror formă este arătată în figura 7.2, *c* și înfășurarea în scurtcircuit, care va fi descrisă mai departe.

● **Subansamblul portperii** (numai la mașinile cu inele) este prevăzut cu perii de cărbune-grafit sau metal-grafit, ce freacă pe inelele colectoare. Periile sînt legate la o placă de borne a rotorului, prevăzută cu trei borne.

● **Ventilatorul.** La mașinile protejate deschise, este montat pe arbore, la interior, un ventilator care asigură circulația aerului, care este absorbit prin ferestrele de intrare și refulat apoi de ventilator din nou în exterior.

La mașinile închise, se montează pe arbore la exterior un ventilator care refulează aerul peste exteriorul carcasei. Pentru a mări suprafața de răcire, carcasa este prevăzută cu mai multe nervuri.

În figura 7.5. sînt arătate schemele convenționale ale motoarelor asincrone.

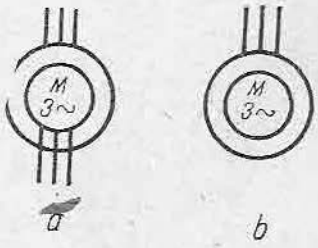


Fig. 7.5. Schemele convenționale ale mașinilor asincrone: *a* — cu inele; *b* — în scurtcircuit.

B. FUNCȚIONAREA MAȘINII ASINCRONE ÎN REGIM DE MOTOR

1. FUNCȚIONAREA CU CIRCUITUL ROTORIC DESCHIS

Acest mod de funcționare, în care circuitul bobinajului rotoric este deschis, nu are importanță practică, însă urmărește să pună în evidență asemănarea care există între funcționarea transformatorului și cea a mașinii asincrone, diferența între mașina asincronă și transformator fiind de ordin constructiv (înfășurare repartizată pe stator și rotor, existența întrefierului etc.).

Dacă la o mașină asincronă cu inele se întrerup toate fazele circuitului rotoric, statorul fiind alimentat de la rețea, bobinajul rotoric nu este parcurs de curent, asupra rotorului nu se produce nici un cuplu și rotorul rămîne nemișcat. Mașina se comportă ca un transformator, mergînd în gol. Primarul său este format din statorul mașinii, iar secundarul, de rotorul său. Deoarece rotorul nu va fi parcurs de curent, în mașină va exista numai fluxul produs de stator, datorită curentului absorbit din rețea. Liniile de cîmp sînt indicate în figura 7.6, *a*. Cea mai mare parte a acestor linii trec prin stator, întrefier și rotor, înlănțuind bobinajul rotoric; ele formează fluxul principal (util sau inductor) Φ. O parte din linii se închid numai în jurul conductoarelor statorului, fără a înlănțui bobinajul rotoric; aceste linii formează fluxul de scăpări al statorului Φ_{s1}.

După cum se știe, cîmpul produs de un bobinaj trifazat, este un cîmp învîrtitor. S-a arătat că viteza unghiulară Ω a acestui cîmp depinde numai de frecvența curenților din bobinaj și de numărul de perechi de poli, avînd valoarea dată de relația (6.8):

$$\Omega = \frac{\omega}{p}$$

în care ω este pulsația curenților, iar p numărul perechilor de poli. Deoarece pulsația curenților este egală cu pulsația rețelei de alimentare, se poate scrie: $\omega = 2\pi f$, în care f este frecvența rețelei. Exprimîndu-se viteza cîmpului învîrtitor n_0 în rotații pe minut, se obține prin această viteză valoarea:

$$n_0 = \frac{60}{2\pi}\Omega = \frac{60}{2\pi}\cdot\frac{\omega}{p} = \frac{60}{2\pi}\cdot\frac{2\pi f}{p} = \frac{60f}{p} \quad [\text{rot/min}] \qquad (7.1)$$

(relație care se poate deduce și din relația 6.15).

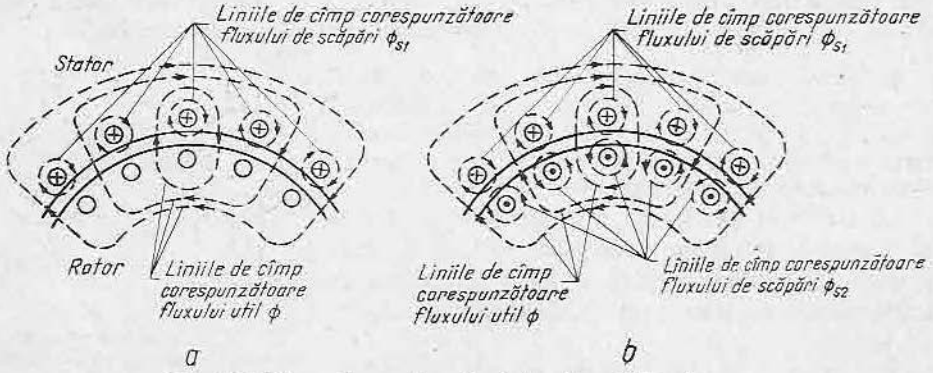


Fig. 7.6. Fluxurile produse de statorul mașinii asincrone:
a — la mersul cu circuitul rotoric deschis; *b* — la mersul în sarcină.

Această viteză se numește *viteză de sincronism*. Deoarece frecvența are, în mod obișnuit, valoarea constantă $f = 50$ Hz, rezultă că viteza de sincronism depinde practic numai de numărul perechilor de poli și are una din valorile indicate mai jos:

$p = 1 : n_0 = 3\,000$ rot/min;
$p = 2 : n_0 = 1\,500$ rot/min;
$p = 3 : n_0 = 1\,000$ rot/min;
$p = 4 : n_0 = 750$ rot/min;
$p = 5 : n_0 = 600$ rot/min;
$p = 6 : n_0 = 500$ rot/min.

Cîmpul învîrtitor inductor Φ, rotindu-se, taie atît conductoarele bobinajului statoric cît și conductoarele bobinajului rotoric, cu aceeași viteză, deci va induce tensiuni electromotoare în ambele bobinaje, ca în orice transformator.

În consecință, în acest regim, deosebirea între mașina asincronă și transformator constă în faptul că, în timp ce în mașina asincronă cîmpul este învîrtitor, în transformator cîmpul este alternativ.

Expresiile tensiunilor electromotoare induse pe fază, conform celor arătate la capitolul 6, sînt:

— în stator:

$$E_1 = 4{,}44\ k_{w1} f w_1 \Phi_m; \tag{7.2}$$

— în rotor:

$$E_{20} = 4{,}44\ k_{w2} f w_2 \Phi_m. \tag{7.3}$$

În relația (7.3) a fost considerată frecvența f, deoarece rotorul este nemișcat și ca urmare t.e.m. indusă în rotor are aceeași frecvență ca cea din stator.

Ecuația de funcționare și diagrama de funcționare a mașinii asincrone cu circuitul rotoric deschis sînt absolut identice cu cele ale transformatorului în gol.

Neglijîndu-se căderile de tensiune produse în primar de curentul absorbit la funcționarea cu circuitul rotoric deschis, se poate scrie:

$$U_1 \simeq E_1.$$

Împărțind relațiile (8.2) și (7.3) rezultă:

$$\frac{U_1}{E_{20}} = \frac{k_{w1} w_1}{k_{w2} w_2} = k_e, \tag{7.4}$$

adică o relație analoagă cu cea de la transformator. Raportul k_e se numește *raport de transformare a tensiunilor*.

2. FUNCȚIONAREA ÎN SARCINĂ

Analogia între transformator și mașina asincronă se menține și în cazul cînd rotorul este mobil. În această funcționare intervine însă un element nou, și anume: mișcarea relativă între bobinajul rotoric și cel statoric. Datorită acestui fapt se produce și transformarea unei părți din energia electrică

în lucru mecanic sau invers. În consecință, transformatorul obișnuit poate fi considerat ca un caz limită de funcționare a mașinii asincrone, și anume, cazul cînd rotorul este imobil și nu are loc o transformare de energie electrică în lucru mecanic (sau invers).

Se consideră un motor cu rotorul scurtcircuitat și statorul cuplat la rețea.

Înfășurarea trifazată a statorului va produce un cîmp învîrtitor, care se rotește cu viteza de sincronism n_0, în sensul succesiunii fazelor. Cîmpul învîrtitor induce în stator și în rotor t.e.m. E_1 și E_2. T.e.m. E_1, împreună cu căderile de tensiune din stator, va echilibra tensiunea aplicată U_1. T.e.m. E_2 produce în înfășurarea rotorului curenții I_2.

Între acești curenți și cîmpul magnetic se vor produce forțe care vor da naștere unui cuplu de rotație, astfel încît rotorul va începe să se rotească. Sensul rotației se determină ținîndu-se seama că, în conformitate cu regula lui Lenz, efectul se opune cauzei. În consecință, se va produce mișcare astfel încît să dispară fenomenul de inducție între stator și rotor, ceea ce este posibil dacă rotorul se rotește în același sens cu cîmpul învîrtitor și cu aceeași viteză n_0.

În realitate, rotorul nu poate atinge viteza n_0, deoarece în acest caz liniile de forță ale cîmpului învîrtitor nu ar mai tăia conductoarele din rotor, sau altfel spus, înfășurarea rotorului s-ar găsi într-un cîmp constant în timp, și deci nu s-ar mai induce t.e.m. E_2 și curentul I_2. Chiar la mersul în gol, turația rotorului nu ajunge la sincronism, deoarece și la mersul în gol mai există încă un cuplu rezistent datorită pierderilor. Pentru a învinge cuplul rezistent în sarcină, rotorul are turația n mai mică decît n_0, astfel încît să existe viteza relativă n_2 a cîmpului învîrtitor față de rotor. În acest caz se induce t.e.m. E_2, apar curenții I_2, producîndu-se și cuplul de rotație.

Mașina absoarbe energia electrică de la rețea și o transformă în lucru mecanic, pentru a învinge cuplul rezistent la arbore, funcționînd în regim de motor.

În concluzie, motorul asincron are turația n totdeauna mai mică decît turația sincronă n_0. Sensul de rotație este sensul cîmpului învîrtitor. La mersul în gol n este foarte apropiat de n_0, iar cu cît sarcina crește, cu atît n scade.

a. Alunecarea

După cum s-a văzut la funcționarea în sarcină, rotorul are o viteză n diferită de n_0, astfel încît cîmpul învîrtitor taie conductoarele rotorului cu viteza $n_2 = n_0 - n$. Raportul s dintre viteza n_2 și viteza de sincronism n_0 se numește *alunecare*:

$$s = \frac{n_2}{n_0} = \frac{n_0 - n}{n_0}, \tag{7.5}$$

sau, în procente:

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} 100[\%]. \tag{7.6}$$

La pornire, cînd $n = 0$, alunecarea este $s = \frac{n_0}{n_0} = 1$. La sincronism, cînd $n = n_0$, alunecarea este $s = \frac{n_0 - n}{n_0} = 0$.

Se menționează că la sarcina nominală, alunecarea are o valoare mică, și anume: 3%—6%, pentru motoare mici, sau chiar 1%—3%, pentru motoare mari, adică viteza de sarcină nominală este apropiată de viteza de sincronism.

Prin rezolvarea ecuației [7.5] în raport cu n, se obține valoarea vitezei cînd se cunoaște viteza de sincronism și alunecarea:

$$n = n_0(1 - s). \tag{7.7}$$

Dacă se aplică la arbore un cuplu motor viteza crește peste valoarea de sincronism, $n > n_0$, astfel încît în rotor se induc curenți care produc un cuplu rezistent, egal dar de sens opus cu cuplul motor; mașina asincronă funcționează în acest caz ca generator, transformînd lucrul mecanic în energie electrică.

În acest caz, alunecarea s conform relației (7.5) devine negativă.

În concluzie, pentru regimul de motor, $n < n_0$, iar alunecarea este cuprinsă între 1 (la pornire) și 0 (la mersul în gol); pentru regimul de generator $n > n_0$, iar alunecarea este negativă.

b. Frecvența t.e.m. și curenților din rotor

După cum s-a arătat, cîmpul învîrtitor al statorului 'aie conductoarele rotorului cu viteza $n_2 = n_0 - n$, iar conform relației (6.18), pulsația t.e.m. în rotor este:

$$\omega_2 = p(\Omega_0 - \Omega).$$

Înlocuind în această relație pe $\Omega_0 = \frac{2\pi n_0}{60}$ și pe $\Omega = \frac{2\pi n}{60}$ și știind că $\omega_2 = 2\pi f_2$, rezultă frecvența t.e.m. și curenților din rotor:

$$f_2 = \frac{\omega_2}{2\pi} = \frac{p\left(\frac{2\pi n_0}{60} - \frac{2\pi n}{60}\right)}{2\pi} = \frac{p(n_0 - n)}{60}. \tag{7.8}$$

Frecvența rețelei fiind $f = p\frac{n_0}{60}$, împărțind relația (7.8) cu f, se obține:

$$\frac{f_2}{f} = \frac{n_0 - n}{n_0} = s,$$

de unde:

$$f_2 = sf. \tag{7.9}$$

Această relație arată că frecvența t.e.m. și curenților din rotor este proporțională cu alunecarea.

c. Tensiunile magnetomotoare și fluxurile

La mersul în gol (cu circuitul rotoric închis și alunecarea $\cong 0$) mașina asincronă absoarbe în stator curentul de mers în gol I_0. Statorul produce o tensiune magnetomotoare învîrtitoare F_{j0}, proporțională cu $K_{w1}w_1I_0$ și în fază cu

acest curent, care produce fluxul $\underline{\Phi}$. Din cauza pierderilor în fier, fluxul nu este în fază cu $\underline{I}_0$.

La mersul în sarcină, statorul este parcurs de curentul $\underline{I}_1$, iar rotorul de curentul $\underline{I}_2$, care produc tensiunile magnetomotoare $\underline{F}_1$ proporțională cu $k_{w1}w_1\underline{I}_1$, respectiv $\underline{F}_2$ proporțională cu $k_{w2}w_2\underline{I}_2$.

Tensiunii magnetomotoare F_1 îi corespunde:

— un flux $\underline{\Phi}_1$ care se închide prin stator, întrefier, și se înlănțuie cu bobinajul rotoric;

— un flux $\underline{\Phi}_{s1}$ de scăpări, care se închide în cea mai mare parte prin aer, în jurul conductoarelor statorice (figura 7.6,*b*)

Tensiunii magnetomotoare $\underline{F}_2$ îi corespunde:

— un flux $\underline{\Phi}_2$ care se închide prin stator, întrefier și rotor:

— un flux $\underline{\Phi}_{s2}$ de scăpări, care se închide în cea mai mare parte prin aer, în jurul conductoarelor rotorice (figura 7.6,*b*).

Fluxurile $\underline{\Phi}_1$ și $\underline{\Phi}_2$ se compun într-un flux rezultant $\underline{\Phi}$.

Așa cum s-a arătat în paragraful 6E, viteza de rotație a cîmpului produs de înfășurarea rotorului, și deci a tensiunii magnetomotoare $\underline{F}$ este egală cu viteza de rotație a cîmpului produs de înfășurarea statorului și deci a tensiunii magnetomotoare $\underline{F}_1$. Cu toate că $\underline{F}_1$ și $\underline{F}_2$ sînt produse de curenți cu frecvență diferită, deoarece se rotesc în spațiu cu aceeași viteză pot fi considerați ca fiind produși de două înfășurări trifazate fixe, parcurse de curenți de aceeași frecvență. Prin urmare $\underline{F}_1$ și $\underline{F}_2$ se pot reprezenta și compune ca doi fazori.

Deoarece, după cum se va vedea în paragraful următor, fluxul în mașină este același atît la mersul în gol cît și la mersul în sarcină, compunerea tensiunilor magnetomotoare trebuie să se facă după relația:

$$\underline{F}_1 = \underline{F}_2 + \underline{F}_{10}.$$

Înlocuind cu valorile cu care sînt proporționale, rezultă:

$$k_{w1}w_1\underline{I}_1 + k_{w2}w_2\underline{I}_2 = k_{w1}w_1\underline{I}_0. \tag{7.10}$$

Împărțind relația precedentă cu k_1w_1 se obține:

$$\underline{I}_1 + \frac{k_{2w2}}{k_{1w1}}\underline{I}_2 = \underline{I}_0. \tag{7.11}$$

C. ECUAȚIILE DE FUNCȚIONARE ȘI DIAGRAMA DE FAZORI

1. ECUAȚIA STATORULUI

Ca și la transformator, ecuația în complex a statorului se scrie sub forma:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + R_1\underline{I}_1 + jX_1\underline{I}_1 \tag{7.12}$$

în care:

$\underline{U}_1$ este tensiunea pe fază aplicată statorului;

$\underline{E}_1$ — t.e.m. indusă de fluxul $\underline{\Phi}$ în înfășurarea statorului, defazată cu $\pi/2$ în urma fluxului;

$R_1\underline{I}_1$ — căderea ohmică de tensiune în stator în fază cu curentul $\underline{I}_1$;

$jX_1\underline{I}_1$ — căderea inductivă de tensiune, defazată cu $\pi/2$ înaintea curentului $\underline{I}_1$;

R_1 — rezistența înfășurării statorului;

X_1 — reactanța de scăpări a statorului.

Deoarece căderile de tensiune $R_1\underline{I}_1$ și $X_1\underline{I}_1$ sînt relativ mici, tensiunea $\underline{U}_1$ poate fi considerată aproximativ egală cu $\underline{E}_1$ și deci se poate scrie:

$$U_1 \cong E_1 \cong 4{,}44\ K_{w1} f w_1 \Phi. \tag{7.13}$$

Deoarece U_1, k_{w1}, f, w_1 sînt constante, din relația (7.13) se deduce că în mașina asincronă fluxul Φ are aproximativ aceeași valoare atît la mersul în gol cît și la mersul în sarcină.

Ecuația de funcționare a rotorului, analoagă cu ecuația pentru secundarul transformatorului este:

$$\underline{E}_2 = \underline{U}_2 + R_2\underline{I}_2 + \mathrm{j}X_{s2}\underline{I}_2, \tag{7.14}$$

în care:

$\underline{E}_2$ este tensiunea electromotoare indusă în rotorul care se rotește cu viteza n, defazată cu $\pi/2$ în urma fluxului inductor;

$\underline{U}_2$ — tensiunea la bornele rotorului;

$R_2\underline{I}_2$ — căderea ohmică de tensiune în care R_2 este rezistența înfășurării rotorului;

$\mathrm{j}X_{s2}\underline{I}_2$ — căderea inductivă de tensiune în rotor în care X_{s2} este reactanța de scăpări a rotorului, la frecvența curenților din rotor, adică $f_2 = sf$.

În cazul mașinii asincrone trebuie să se țină seama de următoarele particularități:

— Deoarece circuitul rotoric este scurtcircuitat, tensiunea $\underline{U}_2$ este nulă: $\underline{U}_2 = 0$ și deci ecuația rotorului devine:

$$\underline{E}_2 = R_2\underline{I}_2 + \mathrm{j}X_{s2}\underline{I}_2. \tag{7.15}$$

— Dacă în expresia tensiunii electromotoare E_2 se înlocuiește $f_2 = sf$, valoarea t.e.m. în rotor la mersul în sarcină devine

$$E_2 = 4{,}44\ k_{w2} f_2 w_2 \Phi = s(4{,}44\ k_{w2} f w_2 \Phi).$$

Ținînd seamă că fluxul Φ este constant, rezultă că expresia din paranteză reprezintă t.e.m. $\underline{E}_{20}$ indusă în rotor la mersul la circuitul rotoric deschis. În consecință:

$$\underline{E}_2 = s\underline{E}_{20}. \tag{7.16}$$

— Reactanța de scăpări X_{s2} la mersul în sarcină depinde de pulsația ω_2 și deci de frecvența f_2:

$$X_{s2} = \omega_2 L_{s2} = 2\pi f_2 L_{s2} = s(2\pi f L_{s2}) = s(\omega L_{s2}),$$

în care L_{s2} este inductanța de scăpări a rotorului. Expresia din paranteză din relația precedentă reprezintă reactanța de scăpări $X_2 = \omega L_{s2}$ a rotorului la frecvența f.

În consecință, reactanța de scăpări a rotorului la alunecarea s este:

$$X_{s2} = sX_2, \tag{7.17}$$

iar ecuația rotorului se poate scrie:

$$\underline{E}_2 = s\underline{E}_{20} = R_2\underline{I}_2 + \mathrm{j}sX_2\underline{I}_2. \tag{7.18}$$

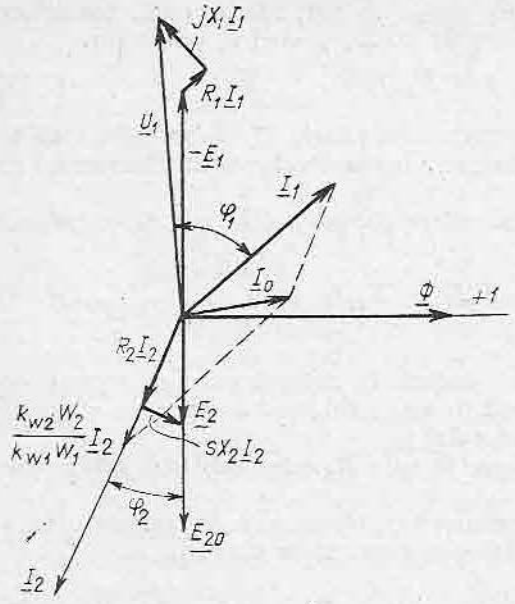


Fig. 7.7. Diagrama de fazori la mersul în sarcină.

3. VALOAREA CURENTULUI ÎN ROTOR

Curentul în rotor are valoarea eficace:

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_{s2}^2}} = \frac{sE_{20}}{\sqrt{R_2^2 + s^2X_2^2}}. \quad (7.19)$$

Curentul I_2 este defazat în urma t.e.m. E_2 cu unghiul φ_2 dat de relația:

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{X_{s2}}{R_2} = \frac{sX_2}{R_2}. \quad (7.20)$$

4. DIAGRAMA DE FAZORI

În figura 7.7 este reprezentată diagrama de fazori, a statorului și a rotorului la mersul în sarcină.

Ca origine de fază este luată originea de fază a fluxului $\underline{\Phi}$. Defazat înaintea fluxului din cauza pierderilor în fier este curentul $\underline{I}_0$. T.e.m. induse în stator și în rotor sînt $\underline{E}_1$ (în figură este reprezentat $-\underline{E}_1$) și $\underline{E}_2$, avînd valorile din relațiile (7.2) și (7.15), defazate cu $\pi/2$ în urmă față de Φ ($-\underline{E}_1$ este defazat înainte cu $\pi/2$). În fază cu $\underline{E}_2$ este reprezentat $\underline{E}_{20}$ cu valoarea din relația (7.3). Defazat în urma lui $\underline{E}_2$ cu unghiul φ_2 (relația 7.20) este trasat fazorul $\underline{I}_2$ (valoarea din relația 7.19) și fazorul $\frac{k_{w2}w_2}{k_{w1}w_1}\underline{I}_2$. Compunînd pe acesta din urmă cu $\underline{I}_0$, se găsește $\underline{I}_1$, conform ecuației (7.11).

Tensiunea $\underline{U}_1$ se găsește construind diagrama după ecuația (7.12). Din vîrful fazorului $-\underline{E}_1$ se trasează în fază cu $\underline{I}_1$, căderea ohmică de tensiune $R_1\underline{I}_1$ și apoi defazat cu $\pi/2$ înainte căderea inductivă de tensiune $jX_1\underline{I}_1$. Unindu-se originea cu vîrful acestui din urmă fazor, se găsește tensiunea $\underline{U}_1$ și unghiul φ_1 de defazaj între $\underline{U}_1$ și $\underline{I}_1$.

În fază cu $\underline{I}_2$ se trasează căderea ohmică de tensiune în rotor $R_2\underline{I}_2$ și defazat cu $\pi/2$ înaintea lui $\underline{I}_2$, căderea inductivă de tensiune în rotor $sX_2\underline{I}_2$. Suma lor trebuie să coincidă cu E_2, conform ecuației (7.18).

D. PIERDERILE ȘI RANDAMENTUL. BILANȚUL DE PUTERI

Motorul asincron trifazat absoarbe de la rețea puterea $3U_1I_1 \cos \varphi_1$, în care U_1 și I_1 sînt tensiunea, respectiv curentul pe fază. Exprimată în funcție de tensiunea între faze U și curentul în linie I, puterea absorbită este:

$$P_a = \sqrt{3}UI \cos \varphi \quad (7.21)$$

din care, o parte, $p_{Cu1} = 3R_1I_1^2$ se pierde în bobinajul statorului. Deoarece cîmpul mașinii se rotește față de stator cu viteza n_0, în fierul statorului se produc și pierderile în fier p_{Fe}. Pentru micșorarea pierderilor p_{Fe}, statorul este făcut din tole. Puterea care a rămas (fig. 7.8):

$$P_{em} = P_a - (p_{Cu1} + p_{Fe})$$

este transmisă din stator în rotor, prin intermediul cîmpului învîrtitor.

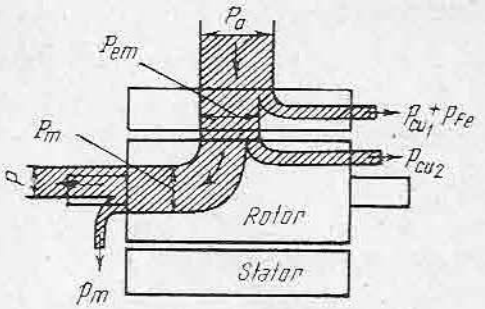


Fig. 7.8. Bilanțul puterilor în mașina asincronă

Puterea P_{em} este denumită *puterea electromagnetică interioară* sau *puterea cîmpului învîrtitor*. Din puterea P_{em}, o parte $p_{Cu2} = 3R_2I_2^2$, se transformă în pierderi în bobinajul rotorului.

Restul de putere:

$$P_m = P_{em} - p_{Cu2} = P_a - (p_{Cu1} + p_{Cu2} + p_{Fe})$$

se transformă în putere mecanică, denumită *putere mecanică totală*. Deoarece, în mod normal, viteza $n_0 - n = n_0 s$ dintre cîmpul învîrtitor și rotor este mică, în fierul rotorului nu se produc pierderi importante de putere; totuși, din motive constructive și rotorul se execută din tole. Din puterea mecanică totală, o parte p_m se pierde prin frecări mecanice în lagăre sau prin frecări între rotor și aer. Restul:

$$P = P_m - p_m = P_a - (p_{Cu1} + p_{Cu2} + p_{Fe} + p_m) = P_a - \Sigma p$$

este puterea mecanică utilă la arbore. Randamentul motorului va fi:

$$\eta = \frac{P}{P_a} = \frac{\sqrt{3}\,UI\cos\varphi - \Sigma p}{\sqrt{3}\,UI\cos\varphi}.$$

E. SCHEMA ECHIVALENTĂ A MAȘINII ASINCRONE

Ca și la transformator, se utilizează pentru studiul mașinii asincrone sistemul de raportare a mărimilor rotorice la stator, pentru a găsi o schemă simplificată și a putea construi diagrame la aceeași scară pentru stator și pentru rotor.

1. RAPORTAREA MĂRIMILOR ROTORULUI LA STATOR

Tensiunea se raportează astfel ca $E_2' = E_1$, adică ținînd seama de relația (7.4):

$$\frac{E_2'}{R_{20}} = \frac{E_1}{E_{20}} = \frac{k_{w1}w_1}{k_{w2}w_2} = k_e,$$

adică tocmai raportul de transformare ce se poate măsura printr-o încercare de funcționare cu circuitul rotoric deschis.

Rezultă că:

$$E_2' = k_e E_{20} = E_1. \tag{7.22}$$

Pentru raportarea curentului se consideră ecuația (7.11) în care se elimină coeficientul lui I_2. Efectuînd raportarea:

$$I_2' = \frac{k_{w2} w_2}{k_{w1} w_1} I_2 = \frac{1}{k_e} I_2, \tag{7.23}$$

ecuația (7.11) devine:

$$\underline{I}_1 + \underline{I}_2' = I_0. \tag{7.24}$$

Rezistențele și reactanțele se raportează cu relațiile:

$$R_2' = R_2 k_e^2; \tag{7.25}$$

$$X_2' = X_2 k_e^2. \tag{7.26}$$

2. ECUAȚIILE MAȘINII ASINCRONE CU MĂRIMILE ROTORICE RAPORTATE LA STATOR

Folosind relațiile de raportare din paragraful precedent, ecuația (7.18):

$$s\underline{E}_{20} = R_2 \underline{I}_2 + \mathrm{j}sX_2 \underline{I}_2$$

devine:

$$s \frac{\underline{E}_2'}{k_e} = \frac{R_2'}{k_e^2} k_e \underline{I}_2' + \mathrm{j}s \frac{X_2'}{k_e^2} k_e \underline{I}_2'$$

sau împărțind cu s și înmulțind cu k_e se obține:

$$\underline{E}_2' = \frac{R_2'}{s} \underline{I}_2' + \mathrm{j}X_2' \underline{I}_2'. \tag{7.27}$$

În acest caz, sistemul de ecuații al mașinii asincrone devine:

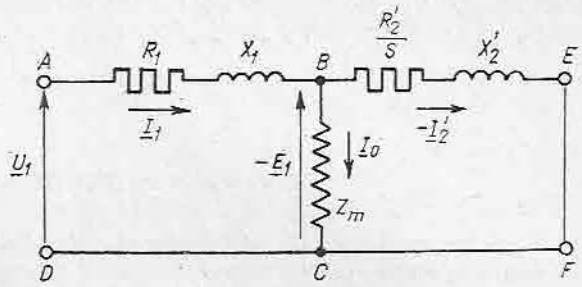
$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + R_1 \underline{I}_1 + \mathrm{j}X_1 \underline{I}_1; \tag{7.12}$$

$$\underline{E}_2' = \frac{R_2'}{s} \underline{I}_2' + \mathrm{j}X_2' \underline{I}_2'; \tag{7.27}$$

$$\underline{I}_1 + \underline{I}_2' = \underline{I}_0. \tag{7.24}$$

Prin acest sistem de ecuații, obținut prin raportarea mărimilor rotorice la stator, rotorul în mișcare în care toate mărimile erau funcție de alunecare, este înlocuit cu un rotor fix, în care t.e.m. E_2' este egală cu E_1 și cu aceeași frecvență f_1, curentul I_2' este de frecvență f_1, reactanța X_2' este corespunzătoare frecvenței f_1, și numai rezistența $\frac{R_2'}{s}$ mai este funcție de alunecare. Deci și la mersul în sarcină cu alunecarea s, există o asemănare între funcționarea mașinii asincrone și funcționarea transformatorului.

Fig. 7.9. Schema echivalentă a mașinii asincrone.



Schema echivalentă a mașinii asincrone, avînd ecuațiile (7.12), (7.27) și (7.24) este reprezentată în figura 7.9.

Observație. Ecuația (7.12) este legea a II-a a lui Kirchhoff aplicată circuitului statorului $ABCD$. Ecuația (7.27) este legea a II-a a lui Kirchhoff aplicată circuitului rotorului raportat $BEFC$, în care EF sînt bornele scurtcircuitate ale rotorului. Ecuația (7.24) este legea I a lui Kirchhoff aplicată nodului B.

F. CUPLUL ELECTROMAGNETIC ȘI CARACTERISTICA MECANICĂ

1. EXPRESIA CUPLULUI

Cuplul electromagnetic M_e este creat de interacțiunea dintre cîmpul învîrtitor produs de stator și curentul I_2 din rotor. Deoarece cîmpul se rotește cu viteza unghiulară Ω_0 puterea electromagnetică se poate scrie:

$$P_{em} = \Omega_0 M_e. \tag{7.28}$$

Puterea mecanică totală dezvoltată în rotor P_m este:

$$P_m = M_e \Omega = M_e(1 - s)\Omega_0. \tag{7.29}$$

La paragraful D s-a văzut că:

$$P_{em} - P_m = p_{Cu2} = 3R_2 I_2^2.$$

Înlocuind în această relație P_{em} și P_m rezultă:

$$M_e \Omega_0 - M_e(1 - s)\Omega_0 = 3R_2 I_2^2,$$

de unde:

$$M_e = \frac{3R_2 I_2^2}{s\Omega_0}. \tag{7.30}$$

Ținînd seama de relația (7.19) și de faptul că $E_{20} = \frac{E_1}{k_e} \cong \frac{U_1}{k_e}$ rezultă:

$$M_e = \frac{3R_2}{\Omega_0 s} \frac{s^2 E_{20}^2}{R_2^2 + s^2 X_2^2} = k_m U_1^2 \frac{R_2 s}{R_2^2 + s^2 X_2^2}, \tag{7.31}$$

în care $k_m = \frac{3}{\Omega_0 k_e^2}$ este o constantă.

Cuplul util la arborele mașinii M este egal cu cuplul electromagnetic, M_e, din care se scade cuplul produs de frecările în lagăre și frecările cu aerul.

Dacă se neglijează cuplul produs de frecări, cuplul util M este aproximativ egal cu cuplul electromagnetic M_e, adică:

$$M = k_m U_1^2 \frac{R_2 s}{R_2^2 + s^2 X_2^2}. \tag{7.32}$$

2. CARACTERISTICA MECANICĂ

Variația cuplului M în funcție de alunecarea s, denumită *caracteristica mecanică* a mașinii, este reprezentată în figura 7.10. Cuplul este nul pentru $s = 0$, adică în cazul cînd turația n a rotorului este egală cu turația sincronă n_0 a cîmpului învîrtitor.

Cuplul trece printr-un maxim M_k la o alunecare $s = s_k$, care este dată de relația:

$$s = \pm \frac{R_2}{X_2} = s_k, \tag{7.33}$$

denumită *alunecare critică*. Valoarea maximă a cuplului se deduce din (7.32) pentru $s = s_k$, deci cuplul maxim are valoarea:

$$M_k = k_m U_1^2 \frac{\pm R_2 \frac{R_2}{X_2}}{R_2^2 + \frac{R_2^2}{X_2^2} X_2^2} = \pm \frac{k_m U_1^2}{2X_2}. \tag{7.34}$$

Cuplul maxim se numește și *cuplu critic* sau *cuplu de desprindere*. După cum se constată ușor, valoarea cuplului maxim nu depinde de rezistența R_2 a rotorului. Alunecarea critică s_k este însă proporțională cu această rezistență.

Zona cuplurilor și alunecărilor pozitive corespunde funcționării mașinii ca motor, zona cuplurilor și alunecărilor negative corespunde funcționării ca generator. Cuplul corespunzător alunecării $s = 1$ ($n = 0$) este cuplul de pornire M_p.

Uneori este necesar să se reprezinte cuplul M în funcție de turația n. Această reprezentare este dată în figura 7.11.

În funcționarea normală, mașina funcționează pe ramura AB a curbei cuplului (fig. 7.10 și fig. 7.11), adică cu alunecări mici, poziția exactă depin-

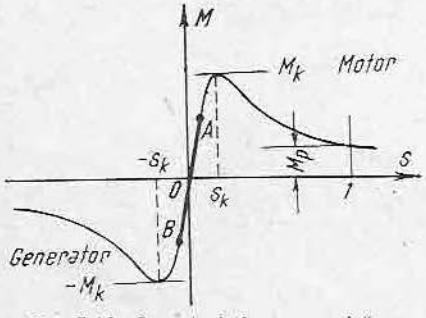


Fig. 7.10. Caracteristica mecanică a mașinii asincrone $M = f(s)$.

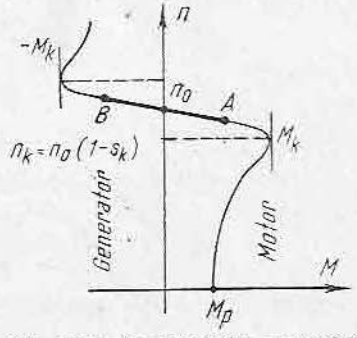


Fig. 7.11. Caracteristica mecanică a mașinii asincrone $M = f(n)$.

zînd de valoarea sarcinii. Cu cît sarcina este mai mare, cu atît alunecarea crește, punctul corespunzător funcționării apropiindu-se mai mult de A sau B. În A sau B cuplul are valoarea nominală M_n. De obicei, valoarea cuplului nominal este aproximativ jumătate din M_k, adică cuplul cu care poate fi încărcată o mașină asincronă nu poate depăși aproximativ jumătate din valoarea cuplului maxim.

G. REGLAREA VITEZEI, PORNIREA ȘI SCHIMBAREA SENSULUI DE ROTAȚIE LA MOTOARELE CU INELE

1. REGLAREA VITEZEI LA MOTOARELE CU INELE

După cum se știe, viteza unui motor asincron se poate scrie sub forma:

$$n = n_0(1 - s) = \frac{60f}{p}(1 - s). \tag{7.35}$$

Din această relație se deduce că viteza n se poate regla prin următoarele mijloace:

— prin variația frecvenței f;
— prin schimbarea numărului de poli $2p$;
— prin variația alunecării s, introducîndu-se rezistențe suplimentare în rotor.

● **Prima metodă,** prin variația frecvenței f, necesită alimentarea motorului de la un generator special prevăzut în acest scop, cu frecvență variabilă, deoarece rețeaua obișnuită are frecvența constantă. Metoda este scumpă și se folosește numai în cazuri speciale, și numai la mașinile în scurtcircuit, cînd este necesară reglarea vitezei simultan la mai multe motoare, de exemplu la acționarea motoarelor pentru role de laminor. Această metodă realizează o reglare continuă a vitezei și nu produce pierderi suplimentare de putere.

● **A doua metodă,** prin schimbarea numărului de poli $2p$, cere un bobinaj special (cu prize) și un comutator care, prin schimbarea conexiunilor, schimbă numărul de poli, atît în stator cît și în rotor.

De exemplu, în figura 7.12 este arătat modul cum prin schimbarea legăturilor la bobinaj se modifică numărul de poli din $2p = 4$ în $2p = 2$.

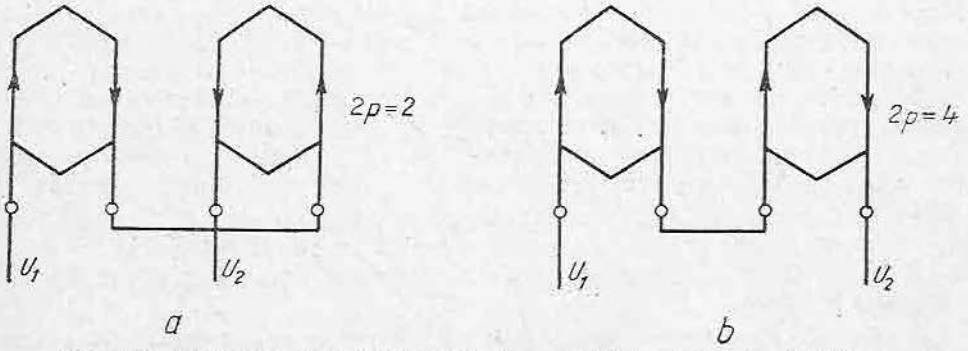


Fig. 7.12. Schimbarea numărului de poli prin modificarea legăturilor la înfășurare.

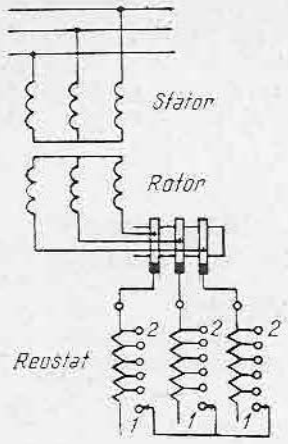


Fig. 7.13. Pornirea și reglarea turației la motoare asincrone cu inele.

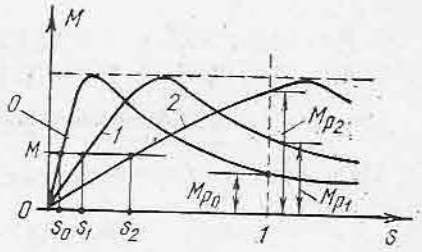


Fig. 7.14. Caracteristica mecanică la reglarea turației motoarelor asincrone cu inele cu ajutorul reostatului.

Schimbarea numărului de poli în rotor face necesare inele suplimentare, care complică mult construcția; din acest motiv, schimbarea numărului de poli la motorul cu inele se folosește rar.

Prin această metodă se obțin 2 sau 3 trepte de viteză, apropiate de vitezele sincrone, fără pierderi suplimentare de putere.

● **A treia metodă,** prin variația alunecării s, este metoda cea mai utilizată de reglare, la motoarele cu inele. Variația alunecării s se obține prin introducerea unor rezistențe suplimentare în circuitul rotorului. În figura 7.13 este arătată schema unui motor, la ale cărui inele este legat un reostat trifazat în stea. Dacă bara de scurtcircuitare a reostatului s-ar găsi pe poziția 2, înfășurarea rotorului ar fi scurtcircuitată și motorul s-ar roti cu turația nominală n. Pe măsură ce bara se deplasează spre poziția 1 din figură, în aceeași măsură se introduc rezistențe suplimentare R_p pe fiecare fază a rotorului.

Pe figura 7.14 curba O reprezintă caracteristica motorului cu inelele scurtcircuitate, deci pentru $R_p = 0$. Introducînd în rotor, cu ajutorul reostatului legat la inele, o rezistență suplimentară R_{p1}, se obține o nouă caracteristică mecanică, reprezentată prin curba *1*; după cum s-a menționat (relația 7.34), cuplul maxim M_k nu depinde de rezistența rotorului, deci pe caracteristica *1* cuplul maxim are aceeași valoare ca pe caracteristica O, însă alunecarea critică a crescut proporțional cu rezistența totală $R_2 + R_{p1}$ a rotorului (relația 7.33). Dacă rezistența rotorului se mărește mult, se obține o caracteristică de forma curbei *2*, pentru care alunecarea critică devine mai mare ca 1.

Pentru un cuplu de sarcină dat M, pe cele trei caracteristici considerate mai sus alunecările sînt s_0, s_1 și s_2; se constată că cu cît rezistența reostatului este mai mare, cu atît alunecarea este mai mare, deci viteza n a motorului este mai mică.

Reglarea vitezei prin reostat produce pierderile suplimentare de putere $3R_pI_2^2$, care micșorează randamentul. Din acest motiv, reglarea vitezei cu

reostat se face cînd se cere reducerea turației cu cel mult 10—20%; o reducere mai mare a turației se admite numai dacă funcționarea cu turație redusă durează un timp scurt.

1. PORNIREA MOTOARELOR CU INELE

Pe caracteristicile din figura 7.14 se constată că cuplul de pornire M_{p0} pe caracteristica *0* cu inele scurtcircuitate este mic și se poate arăta că factorul de putere la pornire este mic, iar curentul de pornire este mare (de 4—7 ori mai mare decît curentul nominal). Prin introducerea de rezistențe suplimentare în rotor, cuplul de pornire crește, factorul de putere crește, iar curentul de pornire scade. Pe figura 7.14 se constată că cuplul de pornire M_{p1} pe caracteristica *1* este mai mare decît pe caracteristica *0* putînd atinge valoarea maximă M_k; dacă însă rezistența reostatului se mărește prea mult, cuplul de pornire scade din nou. În consecință, pentru pornirea motorului cu inele se introduce în circuitul rotorului un reostat de o anumită rezistență; pe măsură ce viteza motorului crește, rezistența reostatului este treptat micșorată, iar în final reostatul este complet scos din circuit, legînd inelele în scurtcircuit.

3. SCHIMBAREA SENSULUI DE ROTAȚIE

După cum s-a arătat în paragrafele anterioare, rotorul motorului asincron se rotește în același sens cu cîmpul învîrtitor, iar sensul cîmpului învîrtitor este în ordinea *1, 2, 3* a succesiunii fazelor, adică sensul în care fazele sînt parcurse de curenți în întîrziere unul față de altul. Pentru schimbarea sensului de rotație al rotorului, trebuie să se inverseze sensul cîmpului învîrtitor. În acest scop, este suficient să se inverseze legăturile între rețea și motor la două din borne, și prin aceasta se schimbă ordinea succesiunii fazelor în stator și deci sensul de rotație al rotorului.

H. VARIANTE CONSTRUCTIVE ALE MOTOARELOR ASINCRONE TRIFAZATE

Pentru simplificarea construcției, motoarele asincrone se pot construi cu rotorul legat permanent în scurtcircuit. În acest caz rotorul nu are inele, iar bobinajul său este format din bare masive conductoare, cîte una în fiecare crestătură, scurtcircuitate la capete cu două inele (fig. 7.15). Din cauza asemănării pe care o are acest bobinaj cu o colivie de veveriță, motorul se numește și *motor cu colivie*. Colivia se execută fie din bare de cupru sau aluminiu care sînt sudate la capete de inelele de scurtcircuitare, fie prin turnare din aluminiu.

În barele coliviei se induc tensiuni electromotoare și curenți. Se poate arăta că un asemenea rotor produce un cîmp învîrtitor care are același număr de poli ca și statorul, independent de numărul

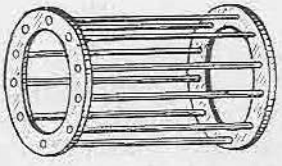


Fig. 7.15. Bobinajul rotorului motoarelor în colivie.

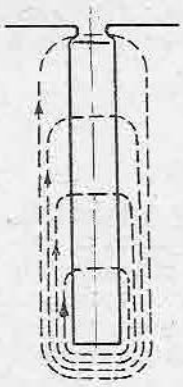


Fig. 7.16. Fluxul de scăpări al crestăturii înalte.

de poli ai bobinajului statoric, ceea ce face posibilă funcționarea mașinii cu orice număr de poli pe stator.

Proprietățile de exploatare ale motorului sînt identice cu proprietățile motorului cu inele, cînd acesta funcționează în scurtcircuit. Viteza poate fi însă reglată numai prin variația frecvenței de alimentare și prin schimbarea numărului de poli (la acest motor este suficient să se schimbe numărul de poli numai în stator, deoarece rotorul va avea automat același număr de poli ca și statorul). Curentul de pornire al motoarelor în scurtcircuit este mare, iar cuplul lor de pornire este mic. Proprietățile de pornire ale acestor motoare se pot îmbunătăți construind motoare cu două colivii coaxiale, denumite *motoare cu dublă colivie*, sau *motoare cu colivie simplă*, la care barele au secțiune dreptunghiulară, cu înălțimea mult mai mare decît lățimea, denumite *motoare cu bare înalte*.

La pornire, aceste două tipuri de mașini au un cuplu mărit, datorită fenomenului de refulare a curentului în barele înalte sau în dublă colivie, fenomen care refulează (împinge) curentul către partea superioară a conductorului din crestătură, în momentul pornirii.

Se presupune că într-o crestătură adîncă a rotorului sînt introduse mai multe conductoare legate în paralel (fig. 7.16). Fluxul de scăpări al crestăturii se repartizează astfel încît, așa cum se vede în figura 7.16, barele din partea inferioară a crestăturii sînt înlănțuite de mai multe linii de forță ale fluxului, decît barele din partea superioară a crestăturii. Aceasta înseamnă că inductanța de scăpări este mai mare pentru barele inferioare decît pentru cele superioare.

Valoarea curentului în rotor, conform relației (7.19) egală cu:

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_{s2}^2}},$$

iar $X_{s2} = 2\pi f_2 L_{s2}$ în care L_{s2} este *inductivitatea de scăpări*.

Cunoscînd că inductivitatea de scăpări este mai mare la barele inferioare, relația precedentă arată că intensitatea curentului I_2 nu se repartizează egal pe conductoarele în paralel (sau pe secțiunea unui conductor masiv din crestătură), ci în conductoarele de la fundul crestăturii curentul este mai mic, iar în conductoarele din partea superioară curentul este mai mare, adică curentul este refulat (împins) în conductoarele de la partea superioară. La funcționarea normală, a motorului, refularea nu are importanță, deoarece f_2 este mic și X_{s2} este de asemenea mic. La pornire, frecvența curenților din rotor f_2 este egală cu frecvența rețelei, X_{s2} are valoarea mare și fenomenul de refulare este foarte accentuat. Refularea curentului la pornire este echivalentă cu micșorarea secțiunii barei din crestătură, ca și cum în crestătură ar exista numai barele din partea superioară, ceea ce conduce la o creștere a rezistenței înfășurării la pornire, avînd ca efect creșterea cuplului de pornire.

Dacă motoarele în scurtcircuit sînt pornite prin cuplare directă la rețea, curentul de pornire este de 4—7 ori mai mare decît curentul nominal.

Curentul de pornire poate fi micșorat numai prin reducerea tensiunii aplicate U_1.

În acest scop se folosesc următoarele mijloace:

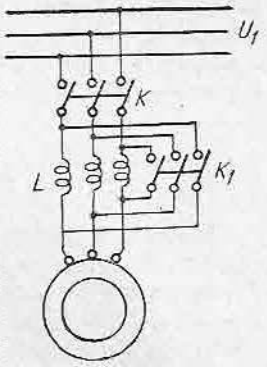


Fig. 7.17. Pornirea motoarelor asincrone cu reactanțe în stator.

● **Pornirea cu reactanță.** În momentul pornirii se leagă în serie cu bobinajul statoric o bobină de reactanță L (fig. 7.17). Curentul de pornire produce căderi de tensiune în bobina de reactanță și tensiunea aplicată motorului se reduce. După terminarea pornirii, bobina de reactanță se scurtcircuitează cu întrerupătorul K_1.

● **Pornirea cu autotransformator.** În momentul pornirii, tensiunea la bornele motorului se reduce cu ajutorul unui autotransformator AT conectat între rețea și bobinajul statoric al motorului (fig. 7.18). Se închid mai întîi întrerupătoarele K_1 și K_2 (K_3 fiind deschis) și motorul pornește cu tensiunea redusă. Se deschide apoi întrerupătorul K_2 și numai după aceea se închide întrerupătorul K_3, alimentînd motorul cu întreaga tensiune a rețelei (dacă se închide K_3 fără a deschide pe K_2, autotransformatorul este legat în scurtcircuit și se arde).

● **Pornirea cu comutator stea-triunghi.** Fie U_{1l} tensiunea de linie a rețelei. Dacă motorul are fazele de bobinaj calculate pentru tensiunea U_{1l}, el poate dezvolta puterea sa nominală numai cînd este legat la rețea cu conexiunile în triunghi. În momentul pornirii, un asemenea motor se cuplează la rețea cu fazele legate în stea deci tensiunea aplicată fazelor se reduce de $\sqrt{3}$ ori, și de asemenea, se reduce de $\sqrt{3}$ ori curentul de pornire pe fază al motorului; este simplu de văzut că curentul de pornire în conductoarele de linie se reduce însă de 3 ori. După ce pornirea este terminată, bobinajul se leagă în triunghi. Schimbarea conexiunilor se face cu ajutorul unui comutator C (fig. 7.19), care, în poziția Y, efectuează conexiunea în stea și în poziția Δ efectuează conexiunea în triunghi.

Pornirea motoarelor în scurtcircuit, prin reducerea tensiunii, reduce cuplul de pornire porporțional cu pătratul tensiunii (relația 7.32) (în cazul

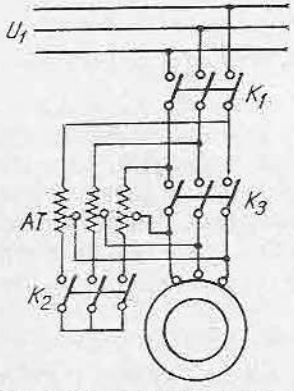


Fig. 7.18. Pornirea motoarelor asincrone cu autotransformator.

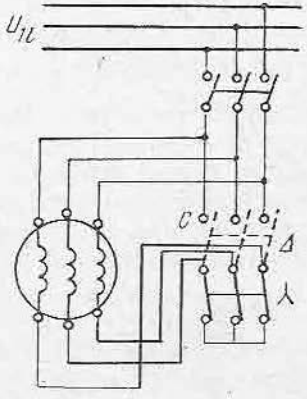


Fig. 7.19. Pornirea motoarelor asincrone cu comutator stea-triunghi.

pornirii cu comutator stea-triunghi cuplul de pornire se reduce de 3 ori). Din acest motiv, dacă nu este posibilă pornirea prin cuplare directă la rețea, folosirea motoarelor în scurtcircuit este limitată la cazurile cînd nu se cere un cuplu de pornire mare.

I. MOTORUL ASINCRON MONOFAZAT

Motorul asincron monofazat are statorul monofazat, iar rotorul în scurtcircuit. Statorul produce un cîmp pulsator care, conform celor arătate la capitolul VI se poate descompune în două cîmpuri învîrtitoare H_d (cîmpul direct) și H_i (cîmpul invers) (fig. 7.20), care se rotesc în sensuri opuse, cu vitezele de sincronism n_0 și respectiv $-n_0$.

Cîmpul învîrtitor H_d produce asupra rotorului un cuplu M_d, ca în orice mașină trifazată; acest cuplu, notat pe figură prin curba M_d, se anulează cînd turația n a rotorului este egală cu turația de sincronism n_0 a lui H_d; pentru $n = 0$, cîmpul H_d produce cuplul de pornire M_{pd} de același sens cu rotația lui H_d. În mod analog, cîmpul H_i produce asupra rotorului un cuplu M_i, care se anulează pentru turația n a rotorului egală cu turația de sincronism a cîmpului H_i, adică pentru $n = -n_0$; pentru $n = 0$, cîmpul H_i produce cuplul de pornire M_{pi} de același sens cu rotația lui H_i deci de sens contrar cu M_{pd}. În consecință, mașina monofazată se comportă ca două mașini trifazate cuplate pe același ax, cu cîmpuri învîrtitoare de sensuri opuse. Pentru o turație oarecare $n = OA$, asupra rotorului, cîmpul H_d produce cuplul $M_d = AB$, iar cîmpul H_i produce cuplul $M_i = AC$, de sens opus. Cuplul rezultant este $M = M_d - M_i = AB - AC = AD$ și variază după curba trasată cu linie întreruptă. Se constată că, din cauza simetriei, cuplurile M_{pd} și M_{pi} sînt egale. În consecință, cuplul rezultant la pornire ($n = 0$) este nul, deci motorul monofazat nu pornește singur. Dacă se dă rotorului un impuls într-un sens oarecare (de exemplu, cu mîna), motorul pornește în sensul în care i s-a dat impulsul. Acest motor nu poate porni decît în gol și numai cînd este posibil să i se dea impulsul. Pentru eliminarea acestui neajuns, motoarele monofazate sînt prevăzute cu dispozitive auxiliare, de exemplu:

— *motor asincron monofazat cu fază auxiliară* (fig. 7.21). Pe stator se așază un al doilea bobinaj (denumit fază auxiliară), care este decalat în spațiu cu $\frac{\pi}{2p}$ față de bobinajul principal. Pentru aceasta, bobinajul principal va ocupa numai 2/3 din crestăturile statorului, ca în schemele din figurile 5.5 și 5.7. În restul de crestături se așază bobinajul fazei auxiliare. Acest bobinaj este conectat la aceeași rețea (în paralel cu bobinajul principal), totuși trebuie să fie parcurs de un curent defazat cît mai mult față de curentul din bobinajul principal, ceea ce se obține montînd în serie cu faza auxiliară o impedanță (rezistență sau condensator). Rezultatele cele mai bune se obțin cu condensator, care poate crea un defazaj apropiat de $\frac{\pi}{2}$. Datorită fazei auxiliare, la pornire se obține un cîmp învîrtitor și un cuplu de pornire, cu atît mai mare cu cît defazajul în faza auxiliară este mai apropiat de $\frac{\pi}{2}$. După pornire, faza auxiliară se întrerupe, sau dacă impedanța este un condensator, poate rămîne în circuit, deoarece îmbunătățește factorul de putere;

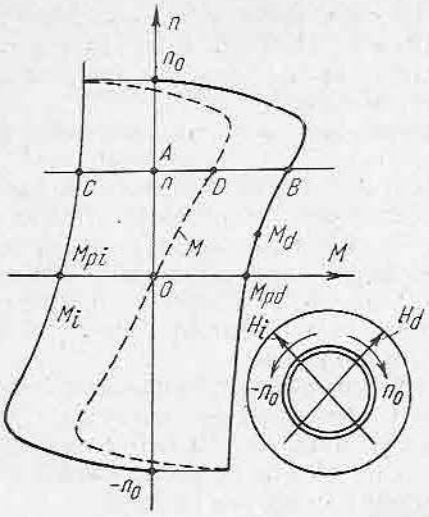


Fig. 7.20. Caracteristica mecanică a motorului asincron monofazat.

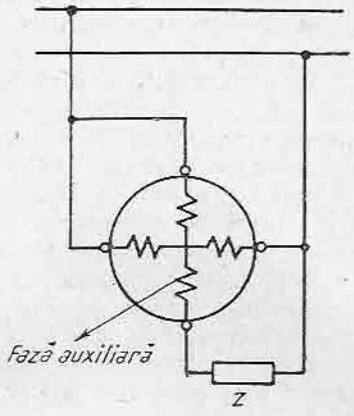


Fig. 7.21. Motor asincron monofazat cu fază auxiliară de pornire.

— *motor asincron monofazat cu spiră în scurtcircuit.* Pe stator sînt așezate cîteva spire în scurtcircuit, care creează o anumită disimetrie în cîmpurile H_d și H_i și deci un cîmp învîrtitor și cuplu de pornire. Statorul este cu poli aparenți pe care este așezat bobinajul principal monofazat legat la rețea. Talpa polară are o crestătură, astfel încît în ea se poate așeza o spiră de cupru legată în scurtcircuit, care să cuprindă o parte din talpa polară. Fluxul alternativ produs de bobinajul principal, induce un curent alternativ în spira în scurtcircuit, care — conform legii lui Lenz — se opune cauzei care l-a produs. Ca urmare, fluxurile pe cele două porțiuni ale tălpii polare sînt diferite ca amplitudine și fază, și produc un cîmp învîrtitor și un cuplu de pornire.

7. EXPLOATARE, DEFECTE ȘI REMEDIERI

● **Exploatare.** În acest paragraf se menționează numai problemele specifice mașinilor asincrone, în completare la cele cunoscute de la cap. 3.

Schemele de acționare a motoarelor asincrone trebuie să prevadă unul din sistemele de pornire arătate anterior. Motoarele de putere mai mică pot fi pornite prin cuplare directă la rețea, cu condiția ca instalația electrică de alimentare să suporte curenții de pornire.

Metoda de pornire în stea-triunghi se poate aplica numai motoarelor construite pentru a funcționa cu înfășurarea legată în triunghi la tensiunea rețelei. La sistemele de protecție cunoscute din cap. 3 (contra scurtcircuitelor suprasarcinilor și de tensiune nulă) trebuie adăugată la motoarele asincrone trifazate protecția contra funcționării în două faze. Dacă un motor asincron este alimentat numai pe două faze, sau dacă se întrerupe înfășurarea unei faze a statorului, atunci motorul nu pornește. Dacă defectul se întîmplă

însă în timp ce motorul funcționează, el va continua să se rotească, dar va absorbi de la rețea un curent mai mare. Dacă nu există un sistem de protecție care să sesizeze că motorul absoarbe curent numai prin două faze, există pericolul supraîncălzirii și arderii izolației înfășurării.

● **Defecte și remedieri.** Defectele bobinajelor de curent alternativ au fost examinate la cap. 5.

La rotoarele în scurtcircuit poate apărea defectul de întrerupere a barei sau o creștere a rezistenței unei bare (de exemplu, din cauza unui contact imperfect la inelul de scurtcircuitare). Acest defect produce supraîncălzirea înfășurărilor motorului. Defectul se pune în evidență, alimentînd statorul cu o tensiune redusă, fără ca rotorul să pornească, și măsurînd curenții pe faze. Dacă la schimbarea poziției rotorului, variază curenții absorbiți de stator, înseamnă că există un defect în barele rotorului.

Față de cele cunoscute de la cap. 3, trebuie menționat că din cauza întrefierului mai mic, la mașina asincronă poate apărea mai des defectul de frecare a rotorului de stator, din cauza uzurii lagărelor sau alt defect mecanic.

În R.S. România se execută motoare asincrone de la puteri fracționare (sub 1 kW) pînă la 1 600 kW și 6 kV în scurtcircuit sau cu inele.

În afară de acestea, se execută motoare asincrone speciale: motoare antigrizutoase de la 2,2 la 30 kW pentru acționări în mine de cărbuni, motoare antiexplozive de la 0,8 la 100 kW pentru industria chimică, motoare de macara de la 0,3 la 60 kW, motoare pentru ascensoare, pompe submersibile, motoare pentru industria metalurgică, pentru nave etc.

APLICAȚII ȘI PROBLEME

1. Un motor asincron cu $2p = 4$ are turația $n = 1\,440$ rot/min. Știindu-se că motorul este alimentat de la o rețea cu frecvența de $f = 50$ Hz, să se determine alunecarea motorului și frecvența curenților induși în rotor.

Răspuns: Turația de sincronism este $n_0 = \frac{60f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1\,500$ rot/min.

Alunecarea este $s = \frac{n_0 - n}{n_0} = 0{,}04$ sau 4%.

Frecvența curenților rotorici este $f_2 = sf = 0{,}04 \cdot 50 = 2$ Hz.

2. Un motor asincron cu $2p = 2$ alimentat de la rețea cu frecvența de 50 Hz funcționează la sarcina normală cu alunecarea $s = 3\%$. Să se determine turația motorului.

Răspuns: Turația de sincronism este $n_0 = \frac{60f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{1} = 3\,000$ rot/min. Din relația alunecării se deduce:

$$sn_0 = n_0 - n$$

$$n = n_0 - sn_0 = 3\,000 - 0{,}03 \cdot 3\,000 = 3\,000 - 90 = 2\,910 \text{ rot/min.}$$

3. Pentru o rețea cu tensiunea de linie 220 V trebuie ales un motor care urmează să fie pornit cu comutator stea-triunghi. Pentru ce tensiune trebuie să fie construit motorul?

Răspuns: Deoarece motorul trebuie să fie pornit cu comutator stea-triunghi, trebuie să aibă șase borne scoase din înfășurarea statorului, iar pentru funcționare normală după pornire, trebuie să funcționeze în triunghi. Deci motorul trebuie să fie construit a funcționa în triunghi la 220 V, și să aibă șase borne la placa de borne. Motorul poate funcționa în mod normal și cu fazele legate în stea, dacă este alimentat de la o rețea de 380 V, însă nu poate fi pornit cu comutator stea-triunghi. Un astfel de motor are indicată pe plăcuța de fabricație conexiunea și tensiunea astfel:

$$\Delta/Y - 220/380 \text{ V.}$$

4. Un motor asincron trifazat are următoarele caracteristici nominale: $P = 30$ kW; $U = 220/380$ V; $\cos\varphi = 0{,}8$; $\eta = 0{,}9$. Să se calculeze: curentul absorbit din rețea și curentul pe fază.

Răspuns: Din relațiile $P_a = \sqrt{3}UI\cos\varphi$ și $\eta = \dfrac{P}{P_a}$ se deduce $I = 24\,084/U$.

Dacă rețeaua este de 220 V, motorul funcționează în triunghi: $I_l = 109{,}4$ A, iar $I_f = 63{,}2$ A. Dacă rețeaua este de 380 V, motorul funcționează legat în stea: $I_l = I_f = 63{,}2$ A.

5. Un motor asincron trifazat are următoarele caracteristici: $P = 20$ kW, $U = 380$ V, $I = 40$ A, $\cos\varphi = 0{,}85$. Să se calculeze randamentul.

Răspuns: 0,89.

REZUMAT

1. Elemente constructive de bază:

- **Statorul**
  - carcasa
  - pachetul de tole
  - înfășurarea statorului
- **Rotorul**
  - cu inele
    - arbore
    - pachet de tole
    - înfășurarea rotorului
    - inele colectoare
  - în scurtcircuit
    - arbore
    - pachet de tole
    - colivie
- **Ventilatorul**
- **Portperiile** (numai la motoare cu inele)
- **Cutia de borne** (la motoare cu inele sînt două cutii de borne)

2. T.e.m. induse la funcționarea cu circuitul rotoric deschis (rotorul fix)

$$E_1 = 4{,}44\ k_{w1} f w_1 \Phi_m$$

$$E_{20} = 4{,}44\ k_{w2} f w_2 \Phi_m$$

- **Raportul de transformare a tensiunilor:**

$$k_e = \frac{k_{w1} w_1}{k_{w2} w_2} = \frac{E_1}{E_{20}} \simeq \frac{U_1}{E_{20}}$$

3. Funcționarea în sarcină:

- **Alunecarea**

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} \cdot 100\ [\%]$$

- **Turația:**

$$n = n_0(1 - s)$$

- **Frecvența în rotor:**

$$f_2 = \frac{p(n_0 - n)}{60} = sf$$

● **Ecuațiile de funcționare:**

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + R_1\underline{I}_1 + jX_1\underline{I}_1$$

$$\underline{E}_2 = \underline{U}_2 + R_2\underline{I}_2 + jX_{s2}\underline{I}_2$$

sau:

$$\underline{E}_2 = s\underline{E}_{20} = R_2\underline{I}_2 + jsX_2\underline{I}_2 \quad \text{(pentru } U_2 = 0\text{)}$$

$$I_1 + \frac{k_{w2}w_2}{k_{w1}w_1}\underline{I}_2 = \underline{I}_0$$

● **Curentul în motor:**

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_{s2}^2}}$$

$$\operatorname{tg}\varphi_2 = \frac{X_{s2}}{R_2} = \frac{sX_2}{R_2}.$$

4. Randamentul motorului trifazat:

$$\eta = \frac{P}{P_a} = \frac{\sqrt{3}UI\cos\varphi - \Sigma p}{\sqrt{3}UI\cos\varphi}$$

5. Schema echivalentă:

● **Relații de raportare:**

$$E_2' = k_e E_{20}$$

$$I_2' = \frac{1}{k_e} I_2$$

$$R_2' = R_2 k_e^2$$

$$X_2' = X_2 k_e^2.$$

● **Ecuațiile mașinii asincrone cu mărimile rotorice raportate:**

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + R_1\underline{I}_1 + jX_1\underline{I}_1$$

$$\underline{E}_2' = \frac{R_2'}{s}\underline{I}_2' + jX_2'\underline{I}_2'$$

$$\underline{I}_1 + \underline{I}_2' = \underline{I}_0$$

6. Cuplul:

$$M \cong M_e = \frac{3R_2I_2^2}{s\Omega_0} = k_m U_1^2 \frac{R_2 s}{R_2^2 + s^2X_2^2}$$

7. Pornirea motoarelor asincrone:

● Cu reostat legat la înfășurarea rotorului (numai la motoare cu inele)

● Prin reducerea tensiunii aplicate în momentul pornirii
- cu reactanțe în stator
- cu autotransformator
- cu comutator stea-triunghi

8. *Reglarea vitezei*:

- Prin alimentare cu frecvență variabilă
- Prin schimbarea numărului de poli
- Cu reostat legat la inele (numai la motoare cu inele)

9. *Schimbarea sensului de rotație:*

- Prin inversarea a două faze la alimentare

10. *Motor asincron monofazat*:

- Cu spiră în scurtcircuit
- Cu fază auxiliară

Capitolul 8

MAȘINI ELECTRICE SINCRONE

A. ELEMENTE CONSTRUCTIVE DE BAZĂ

Mașinile electrice sincrone sînt caracterizate prin faptul că au viteza de rotație egală cu viteza cîmpului învîrtitor, de unde și numele de mașini sincrone.

Ele pot funcționa în regim de motor, în regim de generator sau ca compensatoare de fază.

Motoarele sincrone se folosesc pentru puteri mai mari de 100 kW, în locul motoarelor asincrone, deoarece, deși au o construcție mai complicată, au avantajul că pot funcționa cu un factor de putere cos $\varphi = 1$ sau chiar capacitiv, compensînd astfel energia reactivă consumată de alți receptori din rețea.

Mașinile sincrone se folosesc în special ca generatoare de curent alternativ, în care caz sînt denumite generatoare sincrone sau alternatoare. Mai sînt utilizate denumirile de turboalternator, pentru cazul cînd este antrenat de o turbină cu abur, sau hidroalternator, pentru cazul cînd este antrenat de o turbină hidraulică.

Compensatorul de fază este o mașină sincronă care debitează energie reactivă, în anumite puncte ale unei rețele, pentru a îmbunătăți factorul de putere.

Ca orice mașină electrică, mașina sincronă are un inductor și un indus.

Inductorul are o înfășurare de excitație alimentată în curent continuu, și poate fi rotor sau stator.

Dacă inductorul este rotor, mașina sincronă este denumită *mașină sincronă în construcție normală*, iar dacă inductorul este stator, este denumită *mașină sincronă în construcție inversă*.

Părțile principale ale mașinii sincrone sînt: statorul, rotorul, portperiile, scuturile, lagărele, cutia de borne etc.

1. MAȘINA SINCRONĂ ÎN CONSTRUCȚIE NORMALĂ

● **Statorul** este indus și este format din carcasă, pachetul de tole și înfășurarea statorului, monofazată sau trifazată, absolut identic cu statorul mașinilor asincrone.

● **Rotorul** este inductor avînd o înfășurare de excitație cu același număr de poli ca și statorul. Înfășurarea de excitație este legată la două inele colectoare, de care freacă periile prin care se alimentează excitația cu un curent continuu numit curent de excitație.

Bobinele înfășurării de excitație sînt astfel înseriate, încît polaritatea polilor să alterneze la periferia rotorului.

La mașinile mari, curentul de excitație este furnizat de o mașină de curent continuu, denumită excitatoare, montată pe același arbore cu mașina sincronă. La mașinile mici, generatoarele se pot autoexcita, inelele fiind alimentate de la un redresor conectat la bornele statorului.

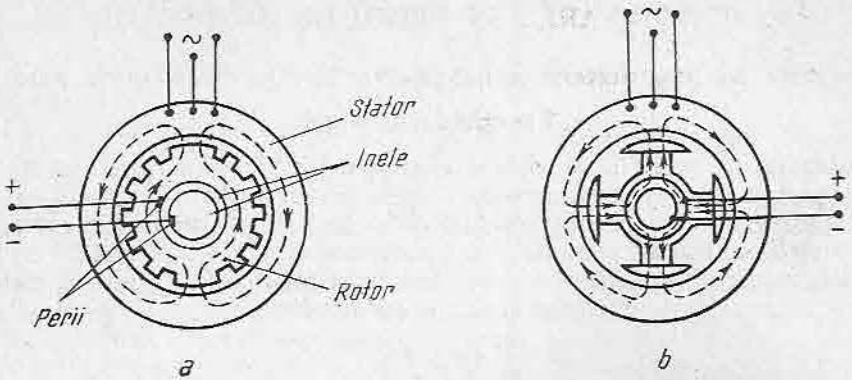


Fig. 8.1. Mașina sincronă în construcție normală:
a — cu poli înecați; *b* — cu poli aparenți.

În funcție de forma constructivă, rotoarele pot fi cu poli înecați (fig. 8.1,*a*) sau cu poli aparenți (fig. 8.1,*b*).

Rotorul cu poli înecați se utilizează pentru mașini cu doi poli și chiar pentru patru poli. El se execută din oțel masiv sau tole, sub formă de cilindru, cu crestături la exterior, în care se introduce înfășurarea de excitație formată din mai multe bobine repartizate în crestături. Crestăturile nu sînt uniform repartizate pe circumferință, ci este prevăzut cîte un dinte mai lat, în axa fiecărui pol. Această construcție are o mare robustețe mecanică și se folosește la viteze mari, de exemplu la turbogeneratoare.

Rotorul cu poli aparenți se utilizează la mașini cu patru poli și mai mult. Polii se execută din oțel masiv sau tole și sînt fixați în butucul rotorului montat pe arbore. Înfășurarea de excitație este formată din bobine polare introduse pe fiecare pol. Această construcție se utilizează la viteze mai mici și, în special, la hidrogeneratoare care au o turație de cîteva sute de rotații pe minut.

2. MAȘINA SINCRONĂ ÎN CONSTRUCȚIE INVERSĂ

● **Statorul** este inductor și este format din carcasă, poli de excitație și bobine polare aflate pe poli, și care se alimentează cu curentul continuu de excitație (fig. 8.2), similar cu statorul mașinii de curent continuu.

● **Rotorul** este indus, format dintr-un pachet de tole cu crestături la exterior în care este introdusă o înfășurare monofazată sau trifazată, legată la inele.

Numărul de inele poate fi 2 pentru înfășurarea monofazată, 3 pentru înfășurarea trifazată sau 4 pentru înfășurarea trifazată cu neutrul scos la placa de borne.

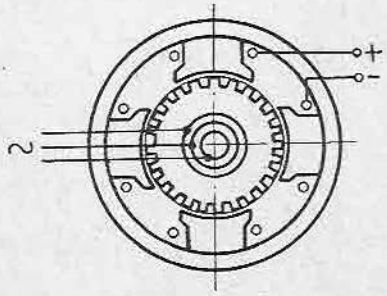


Fig. 8.2. Mașina sincronă în construcție inversă.

B. FUNCȚIONAREA ÎN REGIM DE GENERATOR

1. PRINCIPIUL DE FUNCȚIONARE A GENERATORULUI ÎN CONSTRUCȚIE NORMALĂ

a. Funcționarea în gol

Bobinajul de excitație al rotorului este parcurs de curentul de excitație i și produce un cîmp fix față de rotor, căruia îi corespunde un flux Φ_0. Deoarece rotorul este rotit cu turația n față de stator, cîmpul produs de rotor este cîmp învîrtitor. Din acest motiv, spirele statorului sînt străbătute de un flux variabil, valoarea maximă a acestui flux fiind tot Φ_0. În bobinajul statoric se vor induce tensiuni electromotoare cu frecvența:

$$f = \frac{pn}{60} \tag{8.1}$$

și cu valoarea eficace (care se poate măsura la bornele statorului cu un voltmetru):

$$E_0 = 4{,}44\ k_w f w \Phi_0 \tag{8.2}$$

cunoscută din cap. VI.

T.e.m. E_0 este defazată cu $\frac{\pi}{2}$ în urma fluxului inductor.

Deoarece frecvența tensiunii generatorului trebuie să fie constantă, turația trebuie să fie constantă.

Din relația (8.2) se constată că E_0 este proporțional cu Φ_0, care la rîndul său depinde de valoarea curentului de excitație i. Variația lui E_0 în funcție de curentul de excitație i este denumită *caracteristică de mers în gol* (fig. 8.3) care are forma la fel ca la mașinile de curent continuu, determinată de existența unei t.e.m. remanente E_{0m} datorată unui cîmp remanent al polilor, o porțiune dreaptă a caracteristicii, cînd Φ_0 este proporțional cu i și deci E_0 este proporțional cu i, și porțiunea corespunzătoare saturării circuitului magnetic, cînd fluxul Φ_0 și deci E_0 cresc mai puțin decît proporțional cu i.

b. Funcționarea în sarcină

Dacă la bornele statorului generatorului este legată o sarcină, statorul generatorului va debita un curent I, cu aceeași frecvență f ca și tensiunea electromotoare indusă E_0. Curentul I de sarcină produce la rîndul său un cîmp învîrtitor care are viteza:

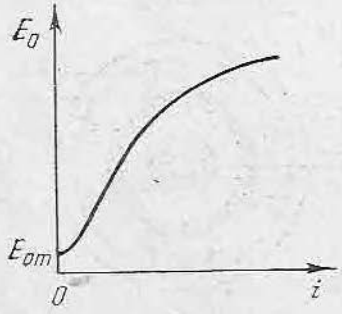


Fig. 8.3. Caracteristica de mers în gol a generatorului sincron.

$$n_0 = \frac{60f}{p} = \frac{60}{p}\frac{pn}{60} = n \tag{8.3}$$

adică aceeași viteză ca și rotorul. Trebuie însă să se țină seama că în practică, frecvența f este dată (frecvența rețelei pe care debitează generatorul), deci viteza n_0 este dată. În consecință, rotorul trebuie să fie antrenat cu viteza $n = n_0$, adică rotorul (cîmpul rotoric) și cîmpul statoric trebuie să aibă riguros aceeași

turație sau, altfel spus, rotorul trebuie să se rotească în sincronism cu cîmpul învîrtitor al statorului.

Făcînd o comparație cu mașina asincronă, se pot constata următoarele asemănări și deosebiri:

— la ambele mașini, cîmpul statoric are aceeași viteză $n_0 = 60\ f/p$, denumită *viteză de sincronism*;

— la mașina asincronă, cîmpul rotoric este produs prin inducție de curenții alternativi din stator și se rotește față de rotor; la mașina sincronă, cîmpul rotoric este produs de curent continuu și este imobil față de rotor;

— la mașina asincronă, cîmpul rotoric și cel statoric au în spațiu (față de stator) aceeași viteză n_0 independent de viteza n a rotorului, astfel încît mașina asincronă funcționează (produce cuplu) la orice viteză n a rotorului; cu excepția vitezei rotorului egală cu viteza de sincronism, $n = n_0$, cînd, neexistînd inducție între stator și rotor, mașina asincronă nu mai produce cuplu; la mașina sincronă, cîmpul rotoric are față de stator viteza n a rotorului, în timp ce cîmpul învîrtitor statoric are viteza n_0, astfel încît mașina sincronă funcționează (produce cuplu) numai cînd rotorul are aceeași viteză $n = n_0$ ca și cîmpul statoric.

c. Reacția indusului

S-a arătat că sistemul de curenți trifazați ce circulă prin stator dă naștere unui flux învîrtitor de reacție Φ_a care se învîrtește cu viteza de sincronism, deci cu aceeași viteză ca și fluxul inductor Φ_0 și în același sens. Cele două fluxuri Φ_0 și Φ_a se compun, dînd un flux rezultant Φ, după ecuația:

$$\underline{\Phi_0} + \underline{\Phi_a} = \underline{\Phi}. \tag{8.4}$$

În funcție de defazajul între curentul de sarcină I și tensiunea electromotoare E, efectele reacției indusului sînt diferite.

Știind că întotdeauna E este defazat cu $\frac{\pi}{2}$ în urma lui Φ iar Φ_a este în fază cu curentul I, se vor analiza efectele reacției indusului pentru diferite defazaje între E și I.

Dacă I este în fază cu E, fluxul de reacție este defazat cu $\frac{\pi}{2}$ în urma fluxului inductor, astfel încît polii fluxului de reacție se găsesc în dreptul axelor dintre polii inductorului. Fluxul de reacție se închide prin stator și rotor perpendicular pe liniile de forță ale fluxului inductor și de aceea se numește și flux transversal. El întărește fluxul inductor pe o jumătate a polului și îl slăbește pe cealaltă jumătate a polului, așa încît fluxul rezultant are aproximativ aceeași valoare cu fluxul inductor, însă este distorsionat, la fel ca la mașinile de curent continuu.

La sarcină inductivă Φ_a micșorează fluxul inductor, iar la sarcină capacitivă Φ_a mărește fluxul inductor, așa cum se va arăta la reprezentarea diagramei fazoriale.

2. ECUAȚIILE DE FUNCȚIONARE

Se notează cu:
R — rezistența ohmică a unei faze a înfășurării statorului:
X — reactanța de scăpări a acestei înfășurări;
E_a — t.e.m. indusă în înfășurarea statorului de fluxul de reacție;
U — tensiunea la borne;
E_0 — t.e.m. indusă în înfășurarea la mersul în gol.
Aplicînd legea a II-a a lui Kirchhoff în circuitul statorului, rezultă:

$$\underline{E}_0 = \underline{U} + R\underline{I} + jX\underline{I} - \underline{E}_a. \tag{8.5}$$

T.e.m. în sarcină este:

$$\underline{E} = \underline{E}_0 + \underline{E}_a = \underline{U} + R\underline{I} + jX\underline{I}. \tag{8.6}$$

În aceste ecuații $\underline{I}$ este defazat față de $\underline{U}$ cu unghiul φ, în funcție de caracterul sarcinii.

3. DIAGRAMA FAZORIALĂ

Luînd ca origine de fază faza tensiunii $\underline{U}$ (fig. 8.4), curentul $\underline{I}$ este defazat în urmă cu φ. În fază cu $\underline{I}$ se găsește căderea de tensiune activă $R\underline{I}$, și cu $\frac{\pi}{2}$ defazat înainte căderea de tensiune inductivă $jX\underline{I}$. Însumînd conform relației (8.6) se găsește t.e.m. în sarcină $\underline{E}$. În fază cu $\underline{I}$ este fluxul $\underline{\Phi}_a$ de reacție și defazată cu $\frac{\pi}{2}$ în urmă este t.e.m. $\underline{E}_a$. Făcînd suma $\underline{E}_0 = \underline{E} - \underline{E}_a$ se găsește t.e.m. $\underline{E}_0$. Defazat cu $\frac{\pi}{2}$ înaintea lui $\underline{E}_0$ se găsește fluxul inductor $\underline{\Phi}_0$. Prin însumarea $\underline{\Phi}_0 + \underline{\Phi}_a$ se găsește fluxul rezultant $\underline{\Phi}$. Unghiul θ între $\underline{E}$ și $\underline{E}_0$ este un unghi de defazaj intern al generatorului și anume este unghiul între fluxul inductor $\underline{\Phi}_0$ și fluxul rezultant $\underline{\Phi}$.

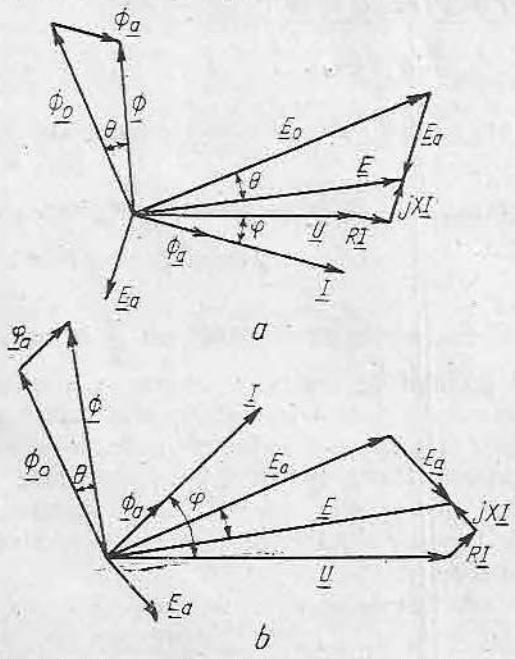


Fig. 8.4. Diagrama fazorială a generatorului sincron.

Din figura 8.4, *a* se constată că la sarcină inductivă, ca urmare a reacției indusului, fluxul rezultant $\underline{\Phi}$ este mai mic decît fluxul inductor. Cu cît φ crește, cu atît acest efect este mai important, iar la sarcină inductivă pură, $\underline{\Phi}_a$ este opus lui $\underline{\Phi}_0$, iar fluxul $\underline{\Phi}$ capătă o valoare minimă.

În figura 8.4, *b* este reprezentată diagrama fazorială în cazul

unei sarcini capacitive. Se constată că fluxul rezultant $\underline{\Phi}$ este mai mare decît fluxul inductor $\underline{\Phi}_0$, iar la limită cînd sarcina este capacitivă pură, $\underline{\Phi}_a$ este în fază cu $\underline{\Phi}_0$, iar $\underline{\Phi}$ capătă o valoare maximă.

Concluzie. Efectul reacției indusului la mașina sincronă depinde de defazajul între E și I și anume:

— *La defazaj zero*, fluxul de reacție $\underline{\Phi}_a$ este defazat cu $\frac{\pi}{2}$ în urma fluxului inductor $\underline{\Phi}_0$. Fluxul $\underline{\Phi}_0$ este distorsionat, iar fluxul rezultant Φ are aproximativ aceeași valoare cu fluxul inductor.

— *La sarcină capacitivă*, fluxul de reacție se compune cu fluxul inductor, iar fluxul rezultant este mai mic decît fluxul inductor în gol.

Ecuația (8.5) se poate simplifica dacă se ține seama că $\underline{E}_a$ este proporțional cu $\underline{\Phi}_a$, iar $\underline{\Phi}_a$, proporțional cu $\underline{I}$. Se poate scrie $\underline{E}_a$ sub forma:

$$-\underline{E}_a = jX_a\underline{I} \tag{8.7}$$

prin care $-\underline{E}_a$ se consideră o cădere de tensiune depinzînd de o reactanță X_a.

În acest fel, ecuația (8.5) devine:

$$\underline{E}_0 = \underline{U} + R\underline{I} + jX\underline{I} + jX_a\underline{I} = \underline{U} + R\underline{I} + j(X + X_a)\,I$$

sau:

$$\underline{E}_0 = \underline{U} + R\underline{I} + jX_s I, \tag{8.8}$$

în care X_s este denumită reactanță totală sau sincronă. Diagrama fazorială se simplifică ca în figura 8.5.

Dacă se neglijează rezistența R a statorului, ecuația (8.8) se simplifică și mai mult, devenind:

$$\underline{E}_0 = \underline{U} + jX_s\underline{I}, \tag{8.9}$$

iar diagrama fazorială se simplifică ca în figura 8.6.

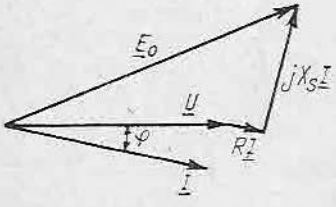


Fig. 8.5. Diagrama fazorială simplificată a generatorului sincron.

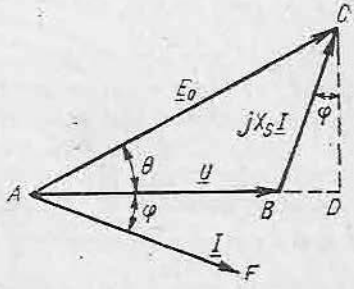


Fig. 8.6. Diagrama fazorială în care se neglijează rezistența statorului.

Se notează cu P_a puterea primită de generator de la motorul său primar. Din această putere se scad pierderile mecanice p_m, pierderile în fier p_{Fe} (aceste pierderi se produc numai în fierul statorului) și pierderile p_e în excitația de pe rotor.

Puterea rămasă $P_{em} = P_a - (p_m + p_{Fe} + p_e)$ este numită *putere electromagnetică*. Ea este transmisă statorului, unde este transformată în putere electrică. Din această putere se scad pierderile de putere în bobinajul statorului $p_{Cu1} = 3RI^2$ (cifra 3 reprezintă numărul de faze ale statorului) și se obține puterea utilă P la borne:

$$P = P_{em} - p_{Cu1} = P_a - (p_m + p_{Fe} + p_e + p_{Cu1}) = P_a - \Sigma p. \quad (8.10)$$

Puterii electromagnetice P_{em} îi corespunde un cuplu electromagnetic M_e care, în cazul de față, este cuplu rezistent. Pentru calculul acestui cuplu se neglijează rezistența R a statorului ($R = 0$). În acest caz, $p_{Cu1} = 3RI^2 = 0$:

$$P_{em} = P = 3UI \cos \varphi.$$

Pe diagrama simplificată din figura 8.6, coborînd o perpendiculară CD pe AB, din triunghiurile dreptunghice ACD și BCD se deduce $CD = CB \cos \varphi = AC \sin \theta = \underline{I}X_s \cos \varphi = \underline{E}_0 \sin \theta$, în care θ este unghiul dintre $\underline{E}_0$ și $\underline{U}$.

Din relația precedentă se deduce:

$$I \cos \varphi = \frac{E_0 \sin \theta}{X_s}. \quad (8.11)$$

Cu aceasta, expresia puterii electromagnetice devine:

$$P_{em} = 3U(I \cos \varphi) = \frac{3UE_0 \sin \theta}{X_s}. \quad (8.12)$$

Deoarece rotorul are viteza unghiulară $\Omega = \frac{2\pi n}{60}$, cuplul electromagnetic are expresia:

$$M_e = \frac{P_{em}}{\Omega} = \frac{3UE_0 \sin \theta}{\Omega X_s}. \quad (8.13)$$

Relațiile (8.12) și (8.13) exprimă puterea electromagnetică, respectiv cuplul, în funcție de parametrii interni ai generatorului și mărimile electrice. Puterea și cuplul sînt proporționale cu $\sin \theta$ în care θ este unghiul de defazaj între t.e.m. $\underline{E}$ și $\underline{E}_0$, egal cu unghiul de defazaj între fluxul rezultant Φ și fluxul inductor Φ_0 și în același timp unghiul de decalaj între polii cîmpului învîrtitor inductor și polii cîmpului învîrtitor rezultant. La mersul în gol, $\theta = 0$, puterea electromagnetică, respectiv cuplul este zero; la $\theta = \frac{\pi}{2}$, puterea și cuplul este maxim.

Dacă se neglijează cuplul produs de pierderi, cuplul electromagnetic M_e este egal cu cuplul M produs de motorul primar la arbore. Notînd cu U_l și I

I_l tensiunea între faze, respectiv curentul în linie, puterea utilă la borne la generatorul trifazat este:

$$P = 3U_f I_f \cos\varphi = \sqrt{3}\, U_l I_l \cos\varphi. \tag{8.14}$$

Randamentul generatorului trifazat este:

$$\eta = \frac{P}{P_a} = \frac{\sqrt{3}U_l I_l \cos\varphi}{\sqrt{3}U_l I_l \cos\varphi + \Sigma p}. \tag{8.15}$$

5. CARACTERISTICILE GENERATORULUI SINCRON ÎN SARCINĂ

Caracteristică externă $U = f(I)$ este curba de variație a tensiunii U la bornele generatorului, cînd debitează singur pe un receptor un curent variabil I, curentul de excitație i și factorul de putere cos φ rămînînd constante.

Dacă factorul de putere cos $\varphi = 1$, caracteristica este ușor coborîtoare, așa cum se vede în figura 8.7.

Dacă factorul de putere este mai mic decît 1, de exemplu 0,8 cu sarcina inductivă, așa cum s-a arătat, reacția indusului micșorează fluxul inductor și cu cît sarcina crește, cu atît tensiunea scade, mai mult însă decît la cos $\varphi = 1$.

Dacă factorul de putere este mai mic decît 1, de exemplu 0,8 capacitiv, reacția indusului întărește fluxul inductor, și pe măsură ce crește curentul, crește și tensiunea, așa cum se vede în figura 8.7.

Variația tensiunii generatorului, numită și cădere sau ridicare de tensiune, este:

$$\Delta U\% = \frac{E_0 - U_n}{U_n}\, 100(\%)$$

adică diferența între t.e.m. la mersul în gol și tensiunea în sarcină nominală, raportată la tensiunea nominală.

Caracteristica de reglaj indică variația curentului de excitație i cu sarcina I, pentru a menține tensiunea constantă la borne. În figura 8.8 sînt reprezentate caracteristicile de reglaj pentru diferiți factori de putere.

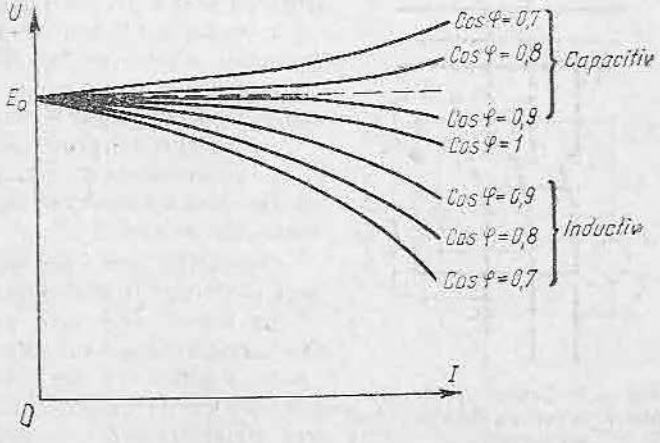


Fig. 8.7. Caracteristica externă a generatorului sincron.

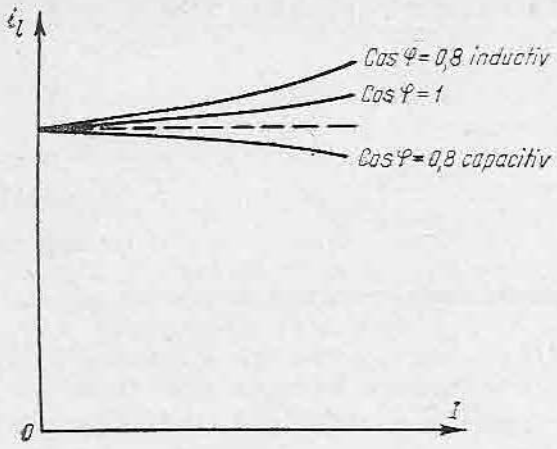


Fig. 8.8. Caracteristicile de reglaj.

Pentru factori de putere inductivi este necesar a se mări i odată cu sarcina, pentru a menține U constant, din cauza reacției indusului. Pentru factori de putere capacitivi, curentul de excitație trebuie micșorat, deoarece reacția indusului întărește fluxul inductor.

C. FUNCȚIONAREA ÎN PARALEL A GENERATOARELOR SINCRONE

1. CUPLAREA ÎN PARALEL

Se presupune că la o rețea trifazată, alimentată de un generator sincron, trebuie legat un nou generator prin închiderea întrerupătorului (fig. 8.9). Dacă între contactele întrerupătorului pe fiecare fază ar exista o diferență de potențial, prin închiderea lui s-ar produce un scurtcircuit ce ar provoca deranjamente importante.

Pentru a evita acest lucru, este necesar ca pe fiecare fază în momentul închiderii, t.e.m. a generatorului să fie egală cu tensiunea U a rețelei. Aceasta se asigură dacă sînt îndeplinite următoarele condiții de conectare în paralel:

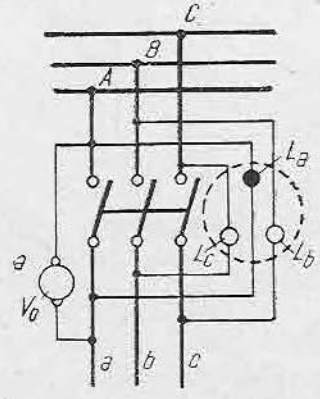


Fig. 8.9. Schema pentru cuplarea la rețea a generatorului sincron trifazat.

— valorile eficace ale t.e.m. a generatorului și tensiunii rețelei să fie egale:

— frecvența t.e.m. a generatorului f_a să fie egală cu frecvența f a rețelei;

— ambele tensiuni să fie în fază;

— succesiunea în timp a fazelor generatorului să fie aceeași cu succesiunea fazelor corespunzătoare ale rețelei.

Operațiile prin care se realizează condițiile de mai sus constituie sincronizarea.

Se aduce mai întîi generatorul la o turație aproximativ egală cu turația nominală, ceea ce se poate verifica cu un frecvențmetru, și apoi se mărește excitația generatorului, pînă cînd tensiunea generatorului este egală cu tensiunea rețelei.

Pentru determinarea momentului sincronizării și verificarea coîncidenței succesiunii fazelor, se folosește un sincronoscop cu ac indicator sau cu lămpi. În figura 8.9 lămpile sincronoscopului sînt legate pentru cuplare „prin foc învîrtitor". Una din lămpi (L_a) este legată direct, iar celelalte două (L_b și L_c) sînt legate încrucișat între faze diferite. Lămpile sînt montate pe un panou, astfel că la stingerea și aprinderea lor într-o anumită succesiune se obține impresia unui foc învîrtitor.

Dacă $f_G < f$, succesiunea de aprindere și stingere va fi într-un sens, iar dacă $f_G > f$, va fi în celălalt sens. Dacă succesiuna fazelor nu este corectă, lămpile se sting și se aprind simultan. Sensul focului învîrtitor indică cum trebuie reglată turația pentru a obține egalitatea frecvențelor. Pe măsură ce se reglează turația, viteza de rotație a focului învîrtitor scade. În momentul cînd frecvențele sînt egale și tensiunile sînt în fază, lampa L_a este stinsă, iar voltmetrul V_a indică zero și se poate face cuplarea în paralel.

După cuplarea la rețea, generatorul nu debitează putere, întrucît puterea primită de la motorul primar acoperă numai pierderile de mers în gol, iar unghiul θ este egal cu zero. Pentru încărcare cu sarcină activă, se mărește admisia la motorul primar (combustibil, abur). Prin aceasta se mărește cuplul la arborele generatorului, rotorul se deplasează înainte față de stator în sensul de rotație și unghiul θ crește.

La funcționarea în paralel a generatoarelor sincrone, în cazul modificării bruște a puterii active (care modifică unghiul θ), rotorul execută o serie de oscilații în jurul noii poziții de funcționare. Pentru amortizarea acestor oscilații se utilizează o înfășurare de amortizare, formată din bare de cupru introduse în crestăturile prevăzute în piesele polare și scurtcircuitate la capete. La rotoarele cu poli înecați se folosesc pene metalice pentru crestături.

2. FUNCȚIONAREA GENERATORULUI SINCRON CUPLAT ÎN PARALEL PE BARELE UNEI CENTRALE

Se consideră din nou diagrama simplificată de funcționare a generatorului sincron, reprezentată prin triunghiul ABC (fig. 8.10). Presupunînd că generatorul funcționează în paralel cu alte generatoare pe barele unei centrale, tensiunea U este constantă, fiind menținută de celelalte generatoare, care au împreună o putere mult mai mare decît a generatorului considerat. De asemenea, în cele ce urmează se va presupune că nu se acționează în nici un mod asupra motorului primar, deci acesta produce un cuplu $M \cong M_e \cong$ constant, ceea ce revine la a presupune că puterea electromagnetică $P_{em} = \Omega M_e$ a generatorului și puterea activă debitată de generator $P = 3UI \cos \varphi$ sînt constante (deoarece $P_{em} \cong P$). În aceste condiții, se va urmări să se determine ce efect are variația curentului de excitație i asupra funcționării generatorului. Este evident că prin variația curentului de excitație i variază tensiunea electromotoare E_0 indusă în bobi-

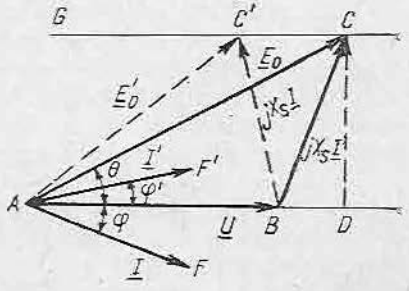


Fig. 8.10. Funcționarea generatorului sincron cu tensiune constantă la borne și cu excitație variabilă.

najul statoric. Se observă însă că variația lui E_0 se face astfel, încît $E_0 \sin \theta$ este constant. Într-adevăr, din relația (8.13) se deduce:

$$E_0 \sin \theta = \frac{\Omega X_S M_e}{3U} = constant, \tag{8.16}$$

deoarece Ω, X_S, M_e, U sînt constante. Coborînd perpendiculara CD din C pe AB, din triunghiul dreptunghic ADC se deduce: $CD = E_0 \sin \theta = constant$, deci, prin variația curentului de excitație, punctul C se deplasează pe o dreaptă CG paralelă cu AB.

Ca urmare a deplasării punctului C, se schimbă mereu direcția lui $\underline{I}X_S$, iar corespunzător se schimbă direcția curentului $\underline{I}$ (se ține seamă că AF este perpendicular pe BC); în consecință, se modifică unghiul cu care este defazat curentul $\underline{I}$ față de tensiunea U.

De exemplu, dacă se reduce curentul de excitație, punctul C se mută în C', iar curentul $\underline{I} = AF$ devine $\underline{I}' = AF'$, cu un defazaj φ' capacitiv.

Rezultă deci că, la generatoarele sincrone care funcționează pe bare la tensiune constantă, variația curentului de excitație nu influențează puterea activă P debitată de generator ($P = 3UI \cos \varphi = constant$); variația curentului de excitație produce numai variația factorului de putere cu care funcționează generatorul — respectiv produce variația puterii reactive. Pentru reglarea puterii active a generatorului (în scopul încărcării sau descărcării sale) este necesar să se acționeze asupra admisiei combustibilului în motorul primar.

D. FUNCȚIONAREA MOTORULUI SINCRON

1. REVERSIBILITATEA MAȘINII SINCRONE. PRINCIPIUL DE FUNCȚIONARE A MOTORULUI SINCRON

Dacă un generator sincron este rotit de un motor primar și debitează energie la rețea, se știe că fluxul învîrtitor inductor al rotorului se rotește odată cu rotorul cu viteza $n = n_0$, iar fluxul statorului se rotește în același sens și cu aceeași viteză (fig. 8.11, *a*). Polii rotorului sînt decalați în spațiu înaintea polilor fluxului rezultant în sensul rotirii cu unghiul θ. Forțele ce se nasc între polii rotorului și cei ai statorului explică apariția cuplului rezistent în cazul generatorului (fig. 8.11, *a*).

Dacă sarcina se micșorează treptat pînă la mersul în gol, fără ca generatorul să fie decuplat de la rețea, unghiul θ se micșorează treptat pînă cînd polii rotorului și polii statorului ajung pe aceeași axă și nu se mai produc forțe între poli, deci dispare cuplul rezistent (fig. 8.11, *b*). Generatorul nu mai debitează energie la rețea, iar de la motorul primar primește numai puterea necesară pentru acoperirea pierderilor la mersul în gol.

Dacă motorul primar începe să funcționeze în regim de frînă, rotorul rămîne în urma fluxului statorului, însă continuă să se rotească cu viteza de sincronism $n = n_0$. Polii rotorului sînt decalați în urma polilor statorului cu unghiul θ (fig. 8.11, *c*).

Forțele ce se nasc între polii rotorului și cei ai statorului produc un cuplu motor, iar mașina funcționează în regim de motor, transformînd energia electrică în energie mecanică.

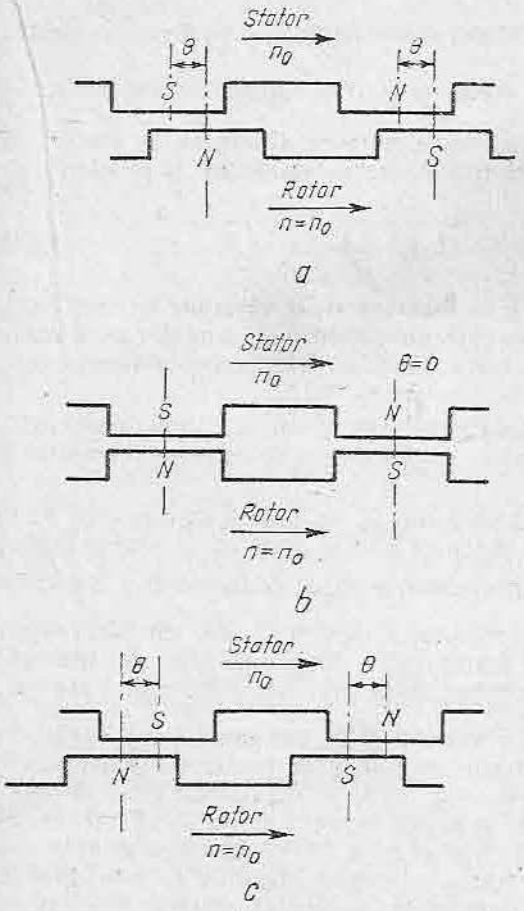


Fig. 8.11. Decalajul polilor cîmpurilor învîrtitoare:
a — la generator; *b* — la mersul în gol; *c* — la motor.

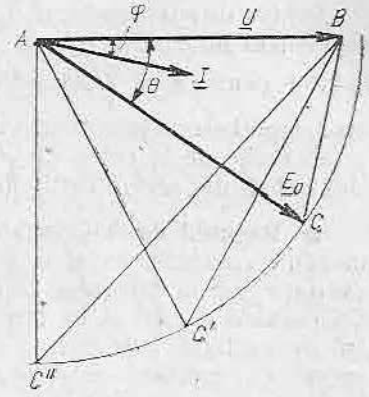


Fig. 8.12. Diagrama fazorială la funcționarea motorului sincron cu i_e constant și M variabil.

2. ECUAȚIA DE FUNCȚIONARE ȘI DIAGRAMA FAZORIALĂ

Notîndu-se cu $\underline{U}$ tensiunea rețelei de alimentare, cu $\underline{E}_0$ t.e.m. indusă în înfășurarea statorului și cu X_s reactanța sincronă, ecuația de funcționare a motorului sincron rezultă:

$$\underline{U} = -\underline{E}_0 + jX_s\underline{I}. \tag{8.17}$$

Diagrama fazorială este reprezentată în figura 8.12, prin triunghiul ABC.

3. CUPLUL MOTORULUI SINCRON ȘI REGIMURILE DE FUNCȚIONARE

● **Cuplul motorului sincron** are aceeași expresie ca la generatorul sincron (8.13):

$$M_e = \frac{P_{em}}{\Omega} = \frac{3UE_0 \sin\theta}{\Omega X_s},$$

Cînd $\theta = 0$, cuplul este zero, motorul merge în gol; cînd $\theta = \frac{\pi}{2}$, cuplul este maxim, iar cînd $\theta > \frac{\pi}{2}$ cuplul devine negativ și mașina se desprinde.

Puterea electromagnetică este egală cu puterea absorbită de stator de la rețea, din care se scad pierderile în înfășurarea statorului și pierderile în fier:

$$P_{em} = P_a - (p_{Cu1} + p_{Fe}). \tag{8.18}$$

● **Regimul de funcționare cu i_e = constant și M variabil.** Se consideră un motor sincron funcționînd în sarcină cu curentul I, cuplul corespunzător unghiului θ și curentul de excitație fiind i_e. Diagrama de funcționare este reprezentată de triunghiul ABC din figura 8.12.

Dacă se menține constant curentul de excitație, t.e.m. E_0 rămîne constantă, iar dacă se variază cuplul, pe măsură ce cuplul crește, se mărește și unghiul θ conform relației (8.13).

Pentru diferite unghiuri θ, vîrful fazorului $\underline{E}_0$ va descrie un cerc (fig. 8.13) cu centrul în A. Din relația (8.13) și figura 8.12 se vede că se obține cuplul maxim pentru $\theta = \frac{\pi}{2}$. Acest cuplu se numește *cuplu de desprindere*, deoarece cînd cuplul crește la această valoare, motorul se desprinde, iese din sincronism și absoarbe de la rețea un curent foarte mare. Motoarele sincrone normale sînt construite astfel încît cuplul nominal să fie mai mic decît cuplul maxim.

● **Regimul de funcționare cu i_e variabil și M constant.** Dacă cuplul se menține constant, ca și la generatorul sincron, prin variația curentului de excitație, vîrful fazorului t.e.m. — $\underline{E}_0$ (fig. 8.13) se deplasează pe o dreaptă CG paralelă cu AB și, ca urmare, se modifică factorul de putere. Cînd curentul de excitație este mare — cazul triunghiului ABC din figura 8.13 (se spune că motorul este supraexcitat) — curentul absorbit $\underline{I}$ este defazat înaintea tensiunii $\underline{U}$, adică — din punctul de vedere al puterii reactive — motorul sincron se comportă ca un condensator. Pentru o anumită valoare a curentului de excitație, cînd punctul C se deplasează în C' pe perpendiculara în B la AB, curentul absorbit $\underline{I}$ este în fază cu tensiunea $\underline{U}$, motorul funcționează cu factor de putere $\cos\varphi = 1$. Dacă curentul de excitație scade sub valoarea de mai sus (motorul este subexcitat), diagrama este reprezentată prin triunghiul ABC'', iar curentul $\underline{I}''$ absorbit este defazat în urma tensiunii $\underline{U}$.

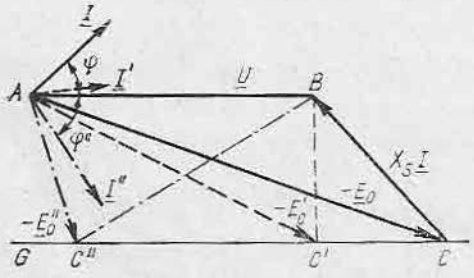


Fig. 8.13. Diagrama fazorială la funcționarea motorului sincron cu i_e variabil și M constant.

De obicei, motorul sincron trebuie să funcționeze supraexcitat, pentru ca, prin puterea reactivă capacitivă pe care o absoarbe, să compenseze puterea reactivă inductivă absorbită de celelalte receptoare inductive ale rețelei, contribuind la îmbunătățirea factorului de putere în rețea.

În acest scop se folosesc și motoare sincrone care funcționează

supraexcitat în gol. Abstracție făcînd de pierderile de putere activă, ele absorb numai putere reactivă capacitivă, pentru îmbunătățirea factorului de putere. Asemenea mașini sînt denumite *compensatoare*.

4. PORNIREA MOTOARELOR SINCRONE

După cum s-a văzut, mașinile sincrone funcționează (produc cuplu) numai cînd rotorul are viteza de sincronism. La pornire, cînd motorul are viteza $n = 0$, cuplul său este nul. În consecință, motoarele sincrone nu pot porni singure, ceea ce constituie un dezavantaj esențial al lor.

Pentru a pune în funcțiune un motor sincron, rotorul trebuie adus la viteză de sincronism printr-o metodă oarecare, după care se conectează statorul la rețea și se încarcă cu o sarcină mecanică.

Există două metode de pornire:

● **Pornirea cu motor auxiliar.** Rotorul este învîrtit de un motor auxiliar cu care este cuplat mecanic și adus la turația de sincronism. Drept motor auxiliar poate fi folosită excitatoarea de curent continuu a motorului sincron, dacă este cuplată mecanic cu rotorul. Se reglează apoi curentul de excitație pentru a se obține t.e.m. nominală, și se cuplează la rețea prin sincronizare la fel ca la generatoare.

Motorul auxiliar trebuie să aibă turație reglabilă, pentru a se putea aduce rotorul motorului sincron exact la viteza cîmpului învîrtitor produs de statorul său. Pentru a nu mări puterea motorului auxiliar, motorul sincron trebuie pornit numai în gol.

● **Pornirea în asincron.** Barele de amortizare ce se găsesc pe rotor, formează colivii, la fel ca la motorul asincron în scurtcircuit. Datorită acestora, motorul asincron prezintă un cuplu electromagnetic asincron, cuplu ce poate fi folosit pentru pornire. Pentru folosirea acestei metode, se leagă mai întîi bobinajul de excitație pe o rezistență (pentru a se evita apariția unor tensiuni prea mari între spirele bobinajului rotoric). Se cuplează statorul la rețea, alimentîndu-l eventual cu tensiune redusă (prin bobină de reactanță sau autotransformator). Motorul pornește cu ajutorul cuplului asincron, însă nu poate atinge viteza sincronă n_0. Cînd viteza ajunge la circa 95% din viteza sincronă, se excită rotorul cu curent continuu, ceea ce produce un cuplu suplimentar, de același sens cu cuplul asincron, care aduce rotorul la sincronism și pornirea este terminată. În funcție de momentul cînd a fost excitat motorul, cuplul suplimentar poate fi însă de sens opus cuplului asincron, în care caz — după excitare — viteza motorului scade; în această ipoteză se întrerupe excitația și se face o nouă încercare, pînă cînd se nimerește o cuplare favorabilă, care produce un cuplu suplimentar de același sens cu cuplul asincron. Asemenea încercări se pot evita prin instalații speciale de automatizare.

În țara noastră se execută o varietate mare de mașini sincrone și anume:

— generatoare pentru grupuri electrogene de la 4 kVA la 300 kVA;

— generatoare pentru centrale electrice pînă la 330 MW;

— motoare sincrone de la 200 la 1 600 kW.

PROBLEME

1. Un generator sincron monofazat debitează un curent de 50 A la tensiunea 231 V și factorul de putere 0,8. Știindu-se că randamentul este $\eta = 0{,}7$, să se calculeze puterea absorbită de la motorul primar.

Răspuns: $P = UI \cos \varphi$, iar $P_a = \dfrac{P}{\eta} = 13{,}2$ kW.

2. Un generator sincron trifazat are $2p = 4$, puterea 30 kW, $U = 400$ V, $\cos \varphi = 0{,}8$, $f = 50$ Hz și $\eta = 0{,}9$. Să se calculeze curentul debitat, turația și puterea absorbită de la motorul primar.

Răspuns: Din relația $P = \sqrt{3}\, UI \cos \varphi$ se deduce $I = 54{,}1$ A; $n = \dfrac{60f}{p} = 1\,500$ rot/min

$$P_a = \frac{P}{\eta} = 33{,}3 \text{ kW}.$$

3. Un generator sincron cu $2p = 2$, este antrenat cu turația $n = 3\,000$ rot/min. Pe fază, sînt $w = 30$ spire, iar factorul de bobinaj $k_w = 0{,}9$. Știind că fluxul este $\Phi_0 = 0{,}02$ Wb, să se calculeze t.e.m. la mersul în gol.

Răspuns: $f = \dfrac{pn}{60} = 50$ Hz; $E_0 = 4{,}44\, k_w f w \Phi_0 = 120$ V.

4. Un generator sincron trifazat are înfășurarea statorului legată în stea, tensiunea între faze $U = 400$ V, curentul $I = 200$ A, și $\cos \varphi = 0{,}8$. Reactanța sincronă a unei faze este $X_s = 0{,}3\ \Omega$. Să se determine E_0, neglijîndu-se rezistența înfășurării.

Răspuns: $\varphi = 36°54'$, iar $\sin \varphi = 0{,}6$. Tensiunea pe fază este $U_f = \dfrac{U}{\sqrt{3}} = 231$ V. Se reprezintă diagrama fazorială similar cu figura 8.10 dar luîndu-se curentul I pe axa reală. În complex $\underline{I} = 200$ A, iar $\underline{U} = U \cos \varphi + jU \sin \varphi = 184{,}8 + j \cdot 138{,}6$. Rezultă, conform relației (8.9), $\underline{E}_0 = 184{,}8 + j \cdot 198{,}6$. Rezultă $E_0 = 271{,}5$ V.

REZUMAT

1. *Tipuri de mașini sincrone:*

- **În construcție normală** { — rotor cu poli înecați; — rotor cu poli aparenți }
- **În construcție inversă**

2. *Elemente constructive de bază:*

- **Mașini în construcție normală:**

Statorul { — carcasa; — pachetul de tole; — înfășurarea statorului }

Rotorul
- cu poli înecați
  - arbore
  - pachet de tole
  - înfășurare de excitație repartizată
  - două inele colectoare
- cu poli aparenți
  - arbore
  - butuc
  - poli de excitație
  - bobine polare
  - două inele colectoare

Portperiile
Ventilatorul
Cutia de borne

- **Mașini în construcție inversă:**

Statorul
- carcasa
- poli
- bobine polare

Rotorul
- arborele
- pachet de tole
- înfășurare monofazată sau trifazată
- inele colectoare

3. *Funcționarea ca generator:*

- **T.e.m. în gol:**

$$E_0 = 4{,}44\ k_w f w \Phi_0.$$

- **Compunerea fluxurilor la mersul în sarcină:**

$$\underline{\Phi}_0 + \underline{\Phi}_a = \underline{\Phi}$$

- **Ecuația de funcționare:**

$$\underline{E}_0 = \underline{U} + R\underline{I} + \mathrm{j}X\underline{I} - \underline{E}_a$$

- **Ecuația simplificată:**

$$\underline{E}_0 = \underline{U} + R\underline{I} + \mathrm{j}X_s\underline{I}$$

în care X_s este reactanța sincronă.

- **Ecuația simplificată, neglijînd rezistența R:**

$$\underline{E}_0 = \underline{U} + \mathrm{j}X_s\underline{I}$$

- **Cuplul electromagnetic:**

$$M_e = \frac{P_{em}}{\Omega} = \frac{3UE_0 \sin\theta}{\Omega X_s}$$

- **Puterea utilă la generatorul trifazat:**

$$P = \sqrt{3}\,UI\cos\varphi$$

4. *Funcționarea în paralel a generatoarelor sincrone trifazate (condiții de funcționare în paralel):*

— T.e.m. egală cu tensiunea rețelei
— Frecvența egală cu frecvența rețelei
— T.e.m. în fază cu tensiunea rețelei
— Succesiunea fazelor să fie aceeași cu cea a rețelei.

5. *Funcționarea ca motor:*

● **Ecuația de funcționare:**

$$\underline{U} = -\underline{E}_0 + jX_s\underline{I}.$$

● **Cuplul motorului sincron:**

$$M_e = \frac{P_{em}}{\Omega} = \frac{3UE_0 \sin\theta}{\Omega X_s} \begin{cases} \theta = 0 \rightarrow \text{mers în gol} \\ \theta = \dfrac{\pi}{2} \rightarrow \text{cuplul maxim} \end{cases}$$

● **Regimuri de funcționare:**

— Cu i_e constant și M variabil
— Cu i_e variabil și M constant.

● **Pornirea motoarelor sincrone:**

— Cu motor auxiliar
— Pornire în asincron.

Partea a doua

ACȚIONĂRI

— Aparate pentru acționări electrice.
— Cinematica și dinamica acționărilor electromagnetice.
— Caracteristicile mecanice ale mașinilor de lucru.
— Caracteristicile mecanice ale motoarelor electrice.
— Regimuri tranzitorii în acționările electrice.
— Alegerea motoarelor electrice de acționare.
— Acționări cu grupuri de mașini.
— Scheme de alimentare și comandă a acționărilor electrice.
— Acționări hidraulice și pneumatice.
— Elemente de execuție.
— Telemecanica.

Capitolul 9

APARATE PENTRU ACȚIONĂRI ELECTRICE

A. APARATE ELECTRICE DE CONECTARE NEAUTOMATE

În toate instalațiile electrice de joasă tensiune se folosesc pe scară largă o serie de aparate neautomate cu acționare manuală, care servesc pentru: conectare și deconectare, protecția circuitelor și racordarea receptoarelor.

Acestea sînt: separatoarele, întrerupătoarele cu pîrghie și pachet, siguranțele și, respectiv, prizele și fișele.

● **Separatoarele** închid sau deschid circuite care nu sînt parcurse de curent. Se montează între porțiunile instalațiilor electrice cu scopul separării acestora, la efectuarea unor manevre de distribuție sau la reparații.

În figura 9.1 este prezentat un separator monopolar. Cadrul *1* se leagă la pămînt. Pe izolatoarele *2* sînt fixate bornele *3*. Contactul fix *4*, (furca), asigură o presiune corespunzătoare pe contactul mobil *5* (cuțitul) care se poate roti în jurul axului *6*.

Avînd un regim de funcționare continuu, separatoarele sînt construite cu contacte foarte bune care asigură o rezistență mică la trecerea curentului.

Sepratoarele sînt lipsite de capacitate de rupere a curenților; astfel se explică absența camerelor de stingere a arcului electric.

Poziția contactelor separatorului este vizibilă pentru a putea verifica cu ușurință starea deschisă sau închisă a circuitului pe care este montat.

Acționarea separatoarelor se face de obicei prin prăjini izolate.

Racordarea separatoarelor reclamă o deosebită grijă la strîngerea șuruburilor bornelor, asigurîndu-se împotriva desfacerii cu șaibe elastice.

Se verifică pătrunderea corectă a contactelor mobile în contactele fixe.

Se construiesc în țară separatoare tripolare pentru interior pentru 1 000 V și curenți nominali de 200 ... 1 000 A.

Atenție! Separatoarele nu se deschid sub sarcină; astfel de manevre conduc la avarii și accidentări grave.

● **Întrerupătoarele cu pîrghie** sînt aparate de joasă tensiune, acționate manual și dimensionate pentru comutarea (închiderea și deschiderea) curenților de servici.

Construcția este asemănătoare cu aceea a separatoarelor dar, spre deosebire de acestea, sînt prevăzute cu dispozitive de protecție împotriva arcului electric.

Din figura 9.2 se observă mînerul de acționare al contactelor mobile; resortul care antrenează contactele mobile imprimă acestora viteza necesară pentru diminuarea efectelor arcului electric.

Datorită ruperii arcului, pe piesele de contact se depune oxid, care se curăță parțial prin frecare în timpul manevrelor.

Întrerupătoarele cu pîrghie asemănătoare celui din figura 9.2 se construiesc în țară pînă la 100A și au o acționare directă a mînerului de manevră asupra contactelor.

Pentru curenții de 200, 350, 600 și 1 000 A se construiesc întrerupătoare cu acționare indirectă, vezi figura 9.3. Maneta *1* fixată pe panou prin prezoanele *2*, acționează prin tija *3*, pîrghia *4* fixată pe axul întrerupătorului.

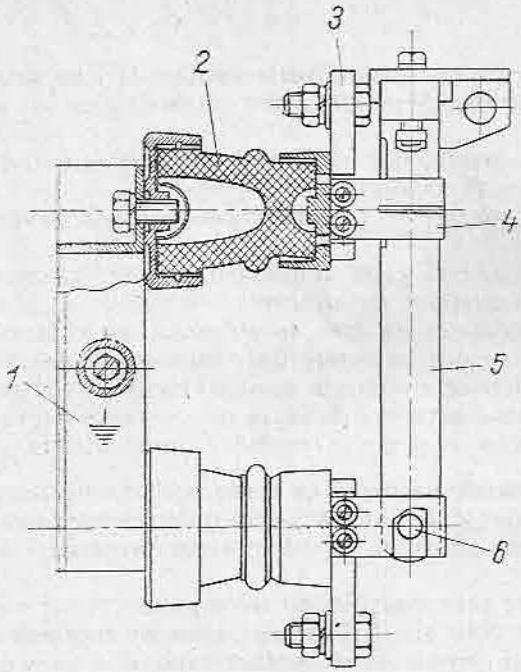


Fig. 9.1. Separator monopolar.

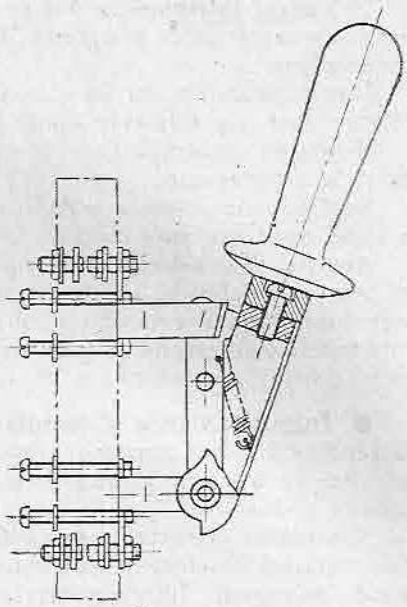


Fig. 9.2. Întrerupător cu pîrghie.

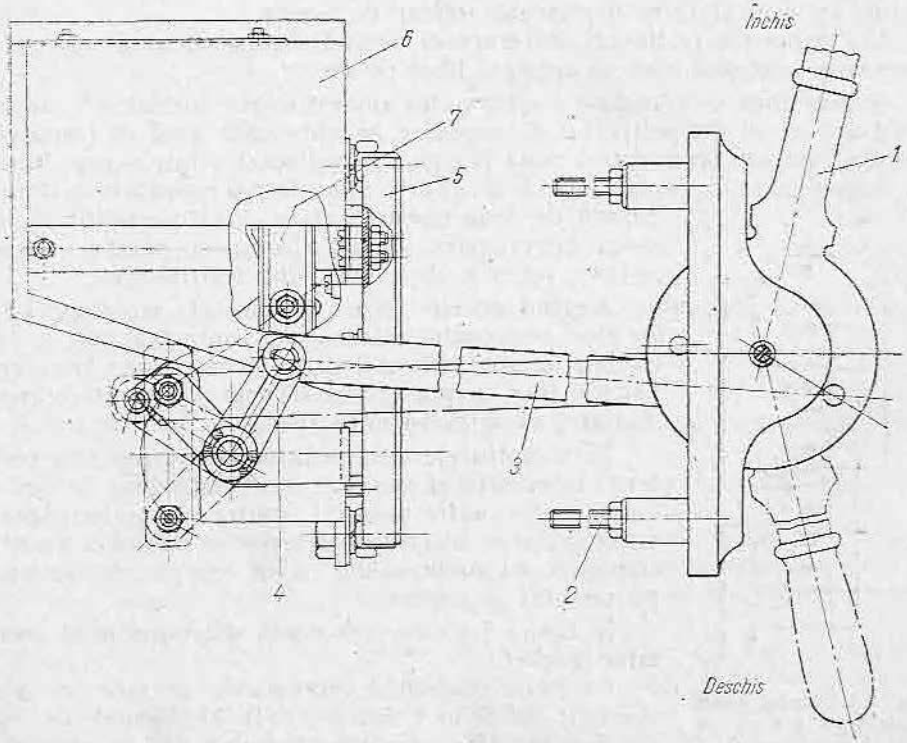


Fig. 9.3. Desen de montaj pentru întrerupătorul cu pîrghie cu acționare indirectă.

Pe cadrul întrerupătorului propriu-zis *5*, sînt fixate contactele fixe, acoperite de camerele de stingere *6*. Contactele mobile *7* sînt rotite de axul întrerupătorului.

Întrerupătoarele cu pîrghie indirecte sînt prevăzute cu dispozitive de blocare într-una din cele două poziții extreme.

Montarea întrerupătoarelor cu pîrghie se face luîndu-se aceleași măsuri ca și la separatoare.

Suplimentar se va acorda o deosebită grijă amplasării corecte, înaintea oricărei manevre sub sarcină, a camerelor de stingere.

Atenție! Racordarea întrerupătoarelor se face întotdeauna astfel încît în poziția deschis să existe tensiune pe contactele fixe, care ocupă poziția superioară față de articulația contactelor mobile; în acest fel închiderea întrerupătoarelor cu pîrghie se face printr-o manevră de jos în sus. Se preîntîmpină astfel o închidere nedorită a circuitelor, care poate conduce la accidente grave.

● **Întrerupătoarele și comutatoarele pachet și cu came** își datoresc larga răspîndire datorită următoarelor calități: permit realizarea unor scheme foarte diferite, au o putere de rupere mare raportată la volum și au dimensiuni de gabarit reduse.

Ansamblul aparatului se obține prin însușirea pe același ax a unui număr variabil de elemente de construcție similară, fiecare element cuprinzînd o cale de curent. Întreruptoarele și comutatoarele pachet cuprind o serie de discuri suprapuse pe care sînt montate contactele fixe. Contactele mobile, din material conductor elastic, cîte unul pentru fiecare sector, sînt așezate pe un ax central și se deplasează solidar cu acesta.

Un dispozitiv realizează întreruperea bruscă, independent de viteza cu care este acționată maneta montată liber pe ax.

Numai după ce maneta s-a rotit cu un anumit unghi, întinzînd în același timp un arc al dispozitivului de sacadare, se eliberează axul cu contactele mobile, care sar brusc într-o nouă poziție. Se realizează o întrerupere bruscă cu două puncte de rupere a fiecărei căi de curent, într-o cameră închisă delimitată de două discuri izolate. Aceste condiții favorizează întreruperea arcului electric și, pentru gabarite reduse, puterile de rupere sînt relativ mari.

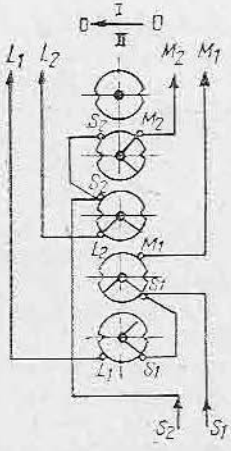


Fig. 9.4. Schema legării contactelor pentru comutatorul pachet.

Alegînd diferite forme de contacte mobile, plasînd în mod convenabil discurile cu contactele fixe și executînd în mod diferit legăturile exterioare între contactele fixe, se pot obține scheme de comutare foarte variate, cu ajutorul unui aparat de gabarit redus.

Întreruptoarele și comutatoarele pachet sînt rezistente la vibrații și șocuri și pot fi introduse în carcase de protecție contra prafului, contra pătrunderii apei și antigrizutoase. Întreruptoarele pachet sînt folosite pentru comanda mașinilor-unelte și ca aparate de comandă pe panouri și pupitre.

În figura 9.4 este prezentată **diagrama unui comutator pachet.**

Conform diagramei, acționarea se face în două direcții: din *0* în I sau din *0* în II. Primul disc este de sacadare, iar următoarele patru discuri sînt căile

de curent. Contactele mobile au fost astfel alese, încît să realizeze în exemplul din figură închiderea căilor de curent de la S_1, S_2 la L_1, L_2 pe poziția I și de la S_1, S_2 la M_1, M_2 pe poziția II.

Se fabrică în țară întrerupătoare și comutatoare pachet și cu came de 10, 25 și 63 A, 380 V, 50Hz, sau 220Vc.c.

● **Siguranțele cu fuzibil** sînt aparate de protecție care întrerup circuitele electrice la trecerea unui curent mai mare decît cel prevăzut, prin topirea unui element fuzibil înseriat în circuit.

Prin creșterea curentului peste limita stabilită, elementul fuzibil se încălzește peste temperatura de topire, iar acesta se topește și întrerupe circuitul.

Timpul după care se topește fuzibilul și la care se întrerupe circuitul depinde de valoarea curentului.

Caracteristicile tehnice ale siguranțelor fuzibile sînt: curentul nominal, tensiunea nominală, caracteristica de topire și capacitatea de rupere.

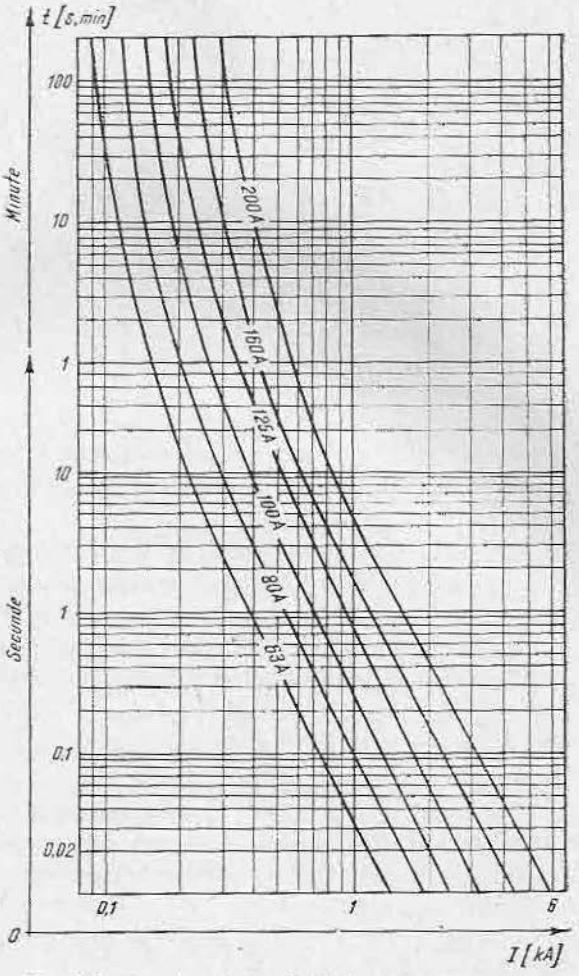


Fig. 9.5. Caracteristica timpului de topire, funcție de curent.

Curentul nominal al siguranței este cel mai mare curent nominal al fuzibilelor pentru siguranța respectivă și se marchează pe soclu.

Caracteristica de topire (fig. 9.5) reprezintă timpul de topire în funcție de curentul care străbate fuzibilul.

În funcție de caracteristica de topire există siguranțe: lente, rapide și ultrarapide.

Capacitatea de rupere este cel mai mare curent de scurtcircuit al rețelei (exprimat în valoare efectivă) la care se garantează o funcționare corectă a siguranței în condiții date de tensiune, factor de putere sau constantă de timp a circuitului.

Din punct de vedere constructiv, cel mai des întîlnite în instalațiile de joasă tensiune sînt siguranțele unipolare cu filet pentru iluminat și forță, avînd curentul nominal între 6 și 100 A. Aceste siguranțe se compun dintr-un soclu, patronul fuzibil și capacul cu filet pentru fixarea patronului în soclu.

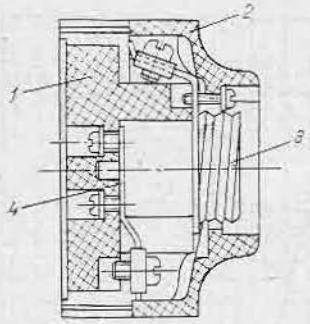


Fig. 9.6. Secțiune prin soclul siguranței *LF*.

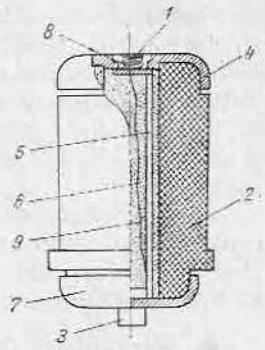


Fig. 9.7. Secțiune printr-un patron de siguranță.

După modul de prindere pe suport izolant (marmoră, pertinax) sau din tablă, soclurile se construiesc cu legături în spate și respectiv cu legături în față (fig. 9.6).

Un soclu tip LF se compune dintr-un suport de porțelan sau bachelită *1*, capacul izolant *2* din același material, teaca filetată *3* și piesa de contact *4*.

Patronul fuzibil reprezentat în secțiunea din figura 9.7 cuprinde: semnalizatorul *1* marcat după un cod al culorilor pentru fiecare valoare a curentului nominal, corpul din porțelan *2*, știftul metalic calibrat *3*, care asigură contactul electric, capacul metalic superior *4*, elementul fuzibil *5*, firul semnalizatorului *6*, capacul inferior *7*, arcul semnalizatorului *8* și umplutura din nisip de cuarț *9*.

Capacul cu filet pentru fixarea patronului (fig. 9.8) se compune dintr-un capac izolant din porțelan *2*, în care se asamblează teaca filetată din alamă *3*, cu aripioarele de fixare *1*; vizorul *4* permite să se constate poziția semnalizatorului patronului.

În figura 9.9, *a*, *b*, *c* se prezintă soclul, fuzibilul și mînerul unei siguranțe cu mare putere de rupere.

În țara noastră se produc siguranțe cu capacitate de rupere mică, mijlocie și cu mare putere de rupere (MPR), cu patroane fuzibile între 0,5 și 630 A, într-o mare diversitate de forme constructive.

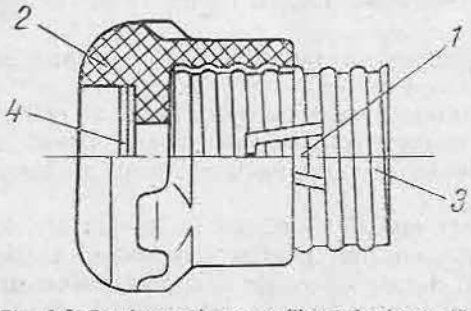


Fig. 9.8. Secțiune prin capac filetat de siguranță.

În acționările electrice, siguranțele realizează protecția împotriva curenților de scurtcircuit.

La alegerea fuzibilelor care protejează un motor, se iau în considerație timpul și curentul de pornire, valoarea curentului de scurtcircuit al rețelei de alimentare, timpul în care trebuie separat motorul de rețea etc. Dimensionarea corectă a fuzibilului se face pe caracteristica timpului de topire în funcție de curent.

După dimensionarea patronului fuzibil se aleg soclul și capacul cu mînerul corespunzător.

Atenție! După ruperea unui scurtcircuit (topirea elementului fuzibil) se procedează la înlocuirea patronului printr-un patron nou, calibrat de fabrica producătoare și pentru același curent nominal. Este interzisă înlocuirea improvizată prin adăugarea unui fir de sîrmă în exteriorul patronului.

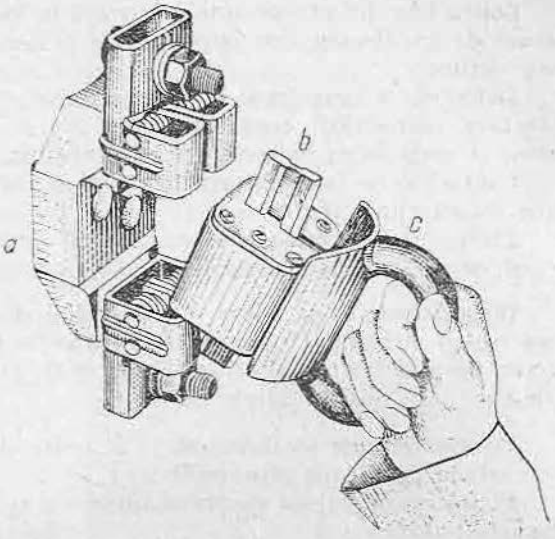


Fig. 9.9. Siguranță cu mare putere de rupere.

● **Prizele și fișele** sînt aparate folosite pentru conectarea la rețelele de joasă tensiune a consumatorilor mobili. Se produc în țară diverse tipuri de prize și fișe industriale pentru curenți de 6, 10, 25 și 63 A și tensiuni pînă la 380 V, 50 Hz.

După numărul de poli, se construiesc prize și fișe bipolare și tripolare; suplimentar acestea sînt prevăzute cu un contact de protecție la care se racordează conductorul de protecție.

Pentru montajul interior, carcasele de protecție sînt din bachelită, iar pentru exterior, din metal turnat, silumin sau fontă.

După felul montajului, prizele se construiesc pentru montaj îngropat (în special pentru mașini-unelte) sau aparent.

La fișele tripolare contactele sînt dispuse în triunghi, astfel încît introducerea în priză să se poată face într-o singură poziție în acest mod se evită inversarea fazelor consumatorului racordat.

Prizele și fișele au o capacitate de rupere de 1,25 I_n, dar o durată de viață mecanică și electrică reduse ca număr; de aceasta se va prefera întotdeauna să se întrerupă curentul prin întrerupător, iar separarea fișei de priză să se execute fără sarcină, asigurîndu-se astfel păstrarea calității contactelor.

La montarea prizelor se verifică prezența tensiunii pe toate contactele de lucru, precum și continuitatea legăturii realizate prin contactul de protecție.

La racordarea fișelor se fixează cu grijă cablul prin dispozitivul special împotriva răsucirii și smulgerii.

Atenție! Este interzisă darea în exploatare a prizelor și fișelor fără legarea conductoarelor de protecție la bornele prevăzute în acest scop atît pe priză cît și pe fișă.

În industrie se folosesc prize și fișe multicontact, avînd pînă la cîteva zeci de contacte, pentru racordarea circuitelor de comandă mobile; contactele acestor aparate sînt dimensionate pentru curenți pînă la 10 A și tensiuni pînă la 380 V. Racordarea conductoarelor se face prin lipire.

● **Repararea aparatelor neautomate.** Defectele aparatelor neautomate se produc la contacte, la dispozitivele de sacadare și la piesele izolante.

Contactele defecte prezintă: înnegrirea locului de contact prin oxidare și uzură de arc electric, încălzire, scîntei și întreruperea circuitului, intermitent sau definitiv.

Defectele neremediate la contacte pot conduce la sudarea acestora, la blocarea manevrării aparatului, precum și la incendii provocate de încălzirea și aprinderea materialelor izolante din apropiere.

Contactele se întrețin prin curățire periodică cu o pilă fină, după care se ung cu vaselină neutră.

Presiunea în contacte se verifică cu dinamometrul; dacă presiunea este mică, se întăresc arcurile sau se înlocuiesc cu contacte noi.

Dispozitivele de sacadare se defectează datorită uzurii pieselor în mișcare sau ruperii arcului. Dispozitivele se întrețin prin ungere cu vaselină și strîngerea periodică a șuruburilor. Reparațiile constau de obicei din înlocuirea pieselor defecte prin altele noi.

Piesele izolante se fisurează și se sparg datorită rezistenței mecanice sau se carbonizează prin supraîncălzire.

Piesele fisurate sau sparte se lipesc cu celuloid dizolvat în acetonă sau cu lacuri epoxidice.

Piesele din bachelită se pot înlocui cu piese confecționate din textolit sau pertinax; după prelucrare, piesele trebuie lăcuite.

Tuburile izolante din pertinax pentru axe se pot repara prin învelire cu hîrtie impregnată cu lac de bachelit.

Ecranele din azbociment defecte se înlocuiesc cu altele noi prelucrate la dimensiune din plăci de azbociment. Ecranele se mai pot confecționa și din plăci de pertinax pe care se lipește azbest pe ambele fețe.

B. RELEE DE PROTECȚIE

În acționările electrice se folosesc, în afara siguranțelor cu fuzibil, o serie de aparate de protecție care la o variație determinată a mărimii pentru care au fost construite, comandă instantaneu sau temporizat comutarea unui contact.

● **Caracteristicile cele mai importante** ale releelor de protecție sînt:

— *valoarea maximă de regim* sau *valoarea eficace a curentului sau a tensiunii*, pe care releul o poate suporta nelimitat, fără a se deteriora;

— *domeniul de reglare pentru care se asigură protecția;*

— *puterea de rupere a contactelor;*

— *timpul de acționare a releului* sau *intervalul dintre momentul atingerii valorii reglate și momentul acționării;*

— *timpul de revenire* sau *intervalul de timp dintre ultima acționare și momentul cînd poate face o nouă acționare* (ansamblul mobil al releului a revenit în poziția inițială).

● Releele de protecție se **clasifică după următoarele criterii:**

— *mărimea electrică de acționat:* relee de curent, relee de tensiune;

— *felul curentului sau tensiunii de acționare:* relee de curent alternativ, relee de curent continuu;

— *funcția realizată:* relee maximale, relee minimale;

— *modul de acționare:* relee cu acționare directă asupra mecanismului de deschidere al întreruptorului, relee cu acționare indirectă — prin închiderea sau deschiderea unor circuite;

— *modul de alimentare:* relee primare — prin a căror bobină trece direct parametrul măsurat, relee secundare — alimentate prin intermediul unor transformatoare de măsurare;

— *timpul de funcționare:* relee instantanee, relee temporizate.

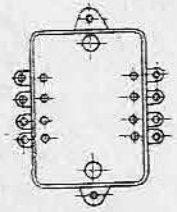


Fig. 9.10. Relee de protecție *RT*, *RC* (vedere).

Cel mai des folosite în acționările electrice sînt releele de curent și tensiune.

În cele ce urmează se prezintă cîteva exemple de relee de protecție; figura 9.10 reprezintă vederea releelor minimale și maximale de tensiune RT-1 și a releului maximal de curent RC-1 fabricate în țară la Uzina Electromagnetica.

Releele de tensiune sînt pentru curent alternativ; cele minimale pentru tensiunile 48, 120, 160 și 320 V, iar cele maximale pentru 60, 200 și 400 V; se pot regla între 0,25 și 0,5 U_n pentru legare în paralel, și între 0,5 și 1 U_n, pentru legare în serie a bobinelor.

Releele de curent sînt de asemenea pentru curent alternativ, pentru valori nominale între 0,05 și 200 A.

● **Releele maximale de curent** protejează motoarele electrice la suprasintensități de scurtă durată de valori reprezentînd multipli ai curentului nominal.

● **Releele termobimetalice** protejează motoarele împotriva unor suprasarcini de lungă durată și de valori foarte apropiate de curentul nominal al releului.

În țară se fabrică relee termice pentru curenți nominali între 10 și 400 A în construcție tripolară din seria TSA. În figura 9.11 este reprodus releul TSAW 400 pentru curenți de serviciu I_s cuprinși între 80 și 400 A; acest aparat se compune dintr-un releu TSA 30 și un transformator de curent prin care se face racordarea în circuit. Din aceeași serie a releelor termobimetalice, celelalte aparate TSA 10, TSA 30 și TSA 63 au racordare directă.

Alegerea releului termobimetalic se face astfel: cunoscînd valoarea curentului nominal al motorului, se alege curentul de serviciu I_s al releului — de valoare imediat superioară; apoi se determină valoarea de declanșare pentru 1,1 I_n al motorului, care trebuie să se încadreze în domeniul de reglare a releului, de preferință înspre limita superioară.

Exemplu: pentru motorul de 75 kW, 150 A, se alege releul TSAW400 P de 400 A curent nominal, avînd un curent de serviciu de 160 A, reglabil între 107 și 160 A, reglat la 160 A.

Reglarea corectă a releelor termice se poate alege cunoscîndu-se caracteristica de declanșare (fig. 9.12) în care este dat timpul de declanșare în funcție de multiplii curentului de serviciu.

Blocurile de relee tripolare din seria TSA sînt prevăzute cu un dispozitiv de protecție diferențial, care produce declanșarea la întreruperea unei faze; de asemenea sînt prevăzute cu compensator al temperaturii mediului ambiant.

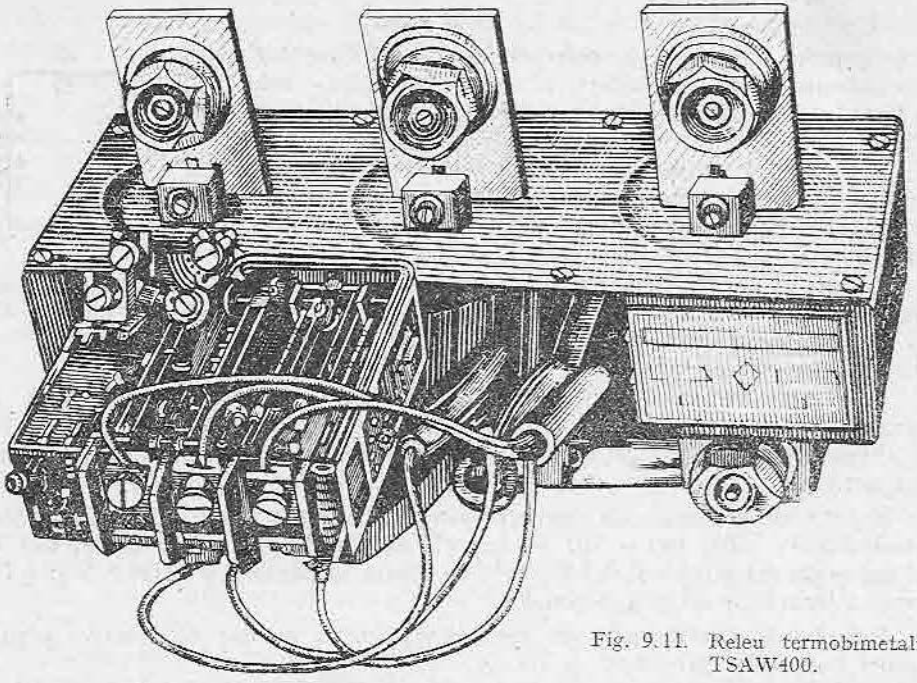


Fig. 9.11. Releu termobimetalic TSAW400.

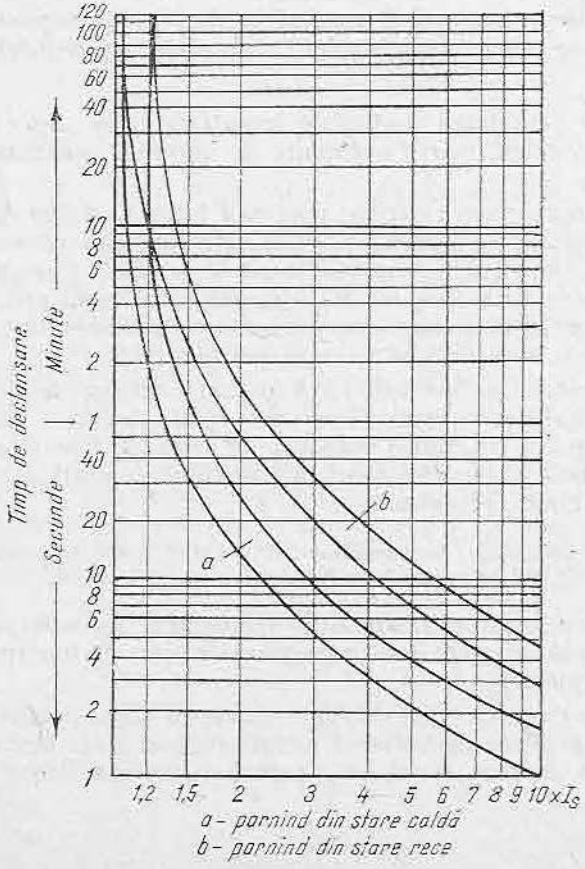


Fig. 9.12. Caracteristica de declanșare a releului TSA30P.

Releele termice se construiesc cu rearmare manuală sau cu revenire automată după declanşare (la răcirea termobimetalelor).

Releele termice se reglează la valoarea prescrisă, după executarea rodajului mecanismului pe care îl antrenează motorul protejat. Reglarea releelor termice se verifică periodic.

Atenţie! La declanşări repetate, este interzisă corecţia reglării releelor sau blocarea contactelor acestuia.

● **Repararea releelor de protecţie.** Defecţiunile care se pot produce la releele termice sînt: distrugerea bimetalelor din cauza încălzirii excesive la trecerea unui curent mult mai mare decît curentul nominal, modificarea caracteristicii de funcţionare a bimetalelor din cauza oxidării şi deteriorarea contactului.

În toate situaţiile enumerate se înlocuiesc subansamblurile defecte, după care aparatul trebuie reglat la parametrii iniţiali.

La releele maximale, defecţiunile se produc fie prin arderea bobinelor, fie prin deteriorarea contactului; după înlocuirea subansamblului defect şi releul maximal trebuie reglat la parametrii iniţiali.

C. APARATE ELECTRICE DE CONECTARE AUTOMATĂ

În categoria aparatelor electrice de conectare automată se includ aparatele de comutare: contactoarele şi releele, precum şi întrerupătoarele automate, care în afara comutării mai realizează de asemenea o funcţie de protecţie.

● **Contactoarele** execută închiderea, deschiderea şi comutarea circuitelor, la comenzi realizate prin contactul unui buton sau al unui releu.

Se acţionează prin comandă locală sau de la distanţă.

Contactoarele au capacitate de rupere importantă şi prezintă rezistenţă mecanică la uzură; permit un număr mare de manevre şi o frecvenţă de conectare ridicată.

Notă. *Ruptoarele* au o construcţie identică cu a contactoarelor, însă contactele principale sînt normal închise.

În aceeaşi categorie intră automatele stea-triunghi, care se compun din două sau din trei contactoare legate astfel încît să poată realiza trecerea succesivă a înfăşurărilor statorice ale unui motor din conexiunea stea, în triunghi.

Se fabrică **contactoare în aer, clasificate astfel:**

— *după felul curentului principal:* contactoare de c.c. şi de c.a.;

— *după felul curentului de comandă:* în c.c. sau în c.a.;

— *după numărul polilor:* monopolare, bipolare, tripolare;

— *după sistemul de acţionare:* electromagnetice şi electropneumatice;

— *după modul de mişcare a contactelor:* cu mişcare de translaţie şi cu mişcare de rotaţie;

— *după natura sarcinii:* rezistivă sau inductivă.

Exemple: tip AC3 — pentru motoare cu rotorul în scurtcircuit şi
tip AC4 — pentru regim de scurtă durată sau intermitent, şocuri puternice şi reversări.

— *după rezistenţa la uzură a contactelor,* exprimată prin numărul de acţionări;

Exemplu: clasa a III-a asigură minimum 1 200 000 acționări.

Electromagneții contactoarelor îndeplinesc următoarele condiții:

— pot suporta un timp nelimitat 1,05 U_n;

— atrag și reține armătura la 0,85 U_n;

— între 0,7 U_n și 0,35 U_n armătura mobilă se desprinde.

Din seria AC3, se fabrică în țară contactoare în gama curenților nominali între 10 și 400 A. Acționarea se face în curent alternativ pentru tensiuni cuprinse între 24 și 500 V, 50 Hz și între 24 și 220 V c.c.; sînt prevăzute cu contacte auxiliare normal deschise și normal închise.

În figura 9.13 este reprezentată vederea laterală a unui contactor AC 3 din seria TCA.

Contactoarele de comandă sînt folosite în schemele de acționări electrice ca relee intermediare pentru multiplicarea unor semnale.

Constructiv, contactoarele de comandă sînt asemănătoare contactoarelor de forță cu excepția sistemului de contacte, care au toate, aceleași caracteristici și permit posibilități variate de combinații de contacte, normal deschise și normal închise.

Se construiesc în țară contactoare de comandă cu opt contacte, pentru tensiuni normalizate ale bobinei de la 24 pînă la 500 V, 50 Hz și de la 24 pînă la 220 V c.c.

Contactele suportă un curent nominal termic de 6 A.

Bobina absoarbe 17 VA în poziția închis și 55 VA în poziția deschis, iar în curent continuu 10 W.

În tabelul 9.1 sînt arătate variantele în care se livrează contactoarele de comandă în funcție de combinația contactelor normal deschise și normal închise; de exemplu contactorul c.c. 62 are 6 contacte n.d. și 2 contacte n.î.

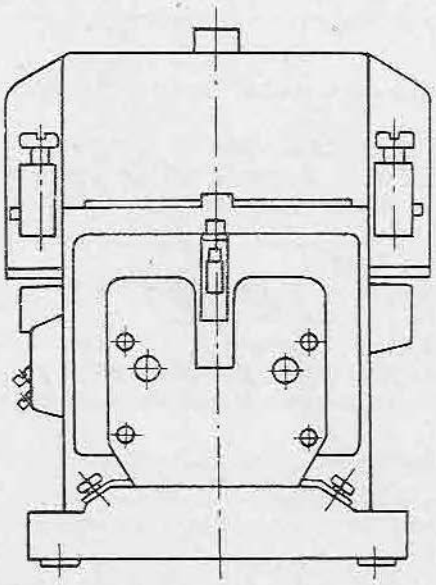


Fig. 9.13. Contactor TCA 40 A (vedere laterală).

CC 80	18 20	22 24	26 28	30 32
CC 71	18 20	3 5	22 24	26 28
CC 62	18 20	3 5	7 9	22 24
CC 53	18 20	3 5	7 9	11 13
CC 44	3 5	7 9	11 13	15 17
	2 4	6 8	10 12	14 16

Tabelul 9.1

Aspectul general al contactorului de comandă este arătat în figura 9.14.

Rezistența la uzura mecanică a contactoarelor de comandă este de 10 milioane de conectări.

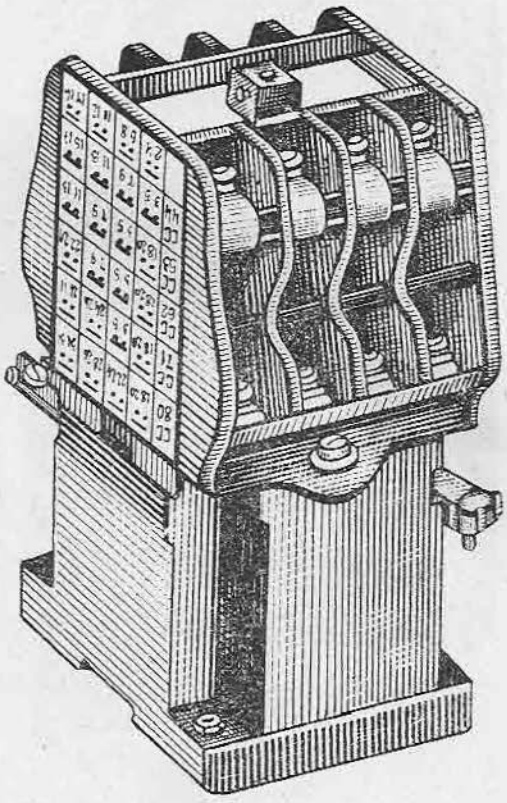


Fig. 9.14. Contactor de comandă.

● În țară se produce o gamă foarte diversă de **relee intermediare** care diferă de contactoarele de comandă prin modul de montare: fixe sau debroșabile, cu contacte realizate prin borne sau prin lipire, cu acțiune instantanee sau temporizată și cu reținerea armăturii prin zăvorîre mecanică sau electromagnetică.

Releele cu reținerea armăturii se numesc și **relee basculante.**

Releele de timp realizează aceeași funcție ca și releele intermediare, dar acțiunea este decalată în timp față de impulsul de comandă.

Clasificarea releelor de timp se face după mai multe criterii și anume:

— *după felul temporizării:* cu temporizare la cuplare (contactele se comută după un interval de timp de la excitarea bobinei), cu temporizare la decuplare (contactele se comută după un interval de timp de la dezexcitarea bobinei);

— *după durata temporizării:* relee de timp scurt, cu domeniul de reglaj pînă la 30 s, relee de timp lung care pot temporiza intervale de ordinul orelor;

— *după elementul de temporizare:* cu electromagnet, cu motor sincron cu electromagnet și mecanism de orologerie, cu dispozitiv electropneumatic;

— *după tensiune*: cu alimentare în c.a., cu alimentare în c.c.

În figura 9.15 este reprezentat un **releu de timp cu temporizare la cuplare,** cu acționare prin motor sincron. Se pot vedea bobina electromagnetului, contactele și dispozitivul de reglaj al temporizării.

Un **releu de timp electropneumatic,** folosit în acționările cu regim de lucru greu de macarale, este alcătuit din: electromagnet, dispozitiv de temporizare pneumatic și contacte.

În secțiunea dispozitivului de temporizare (fig. 9.16) contactele microîntrerupătorului *2* sînt acționate prin intermediul pîrghiei *10* de tija *7*, care la rîndul ei este atrasă de electromagnet. Tija este solidară cu membrana elastică *3*, care separă camera pneumatică în compartimentele *4* și *5*.

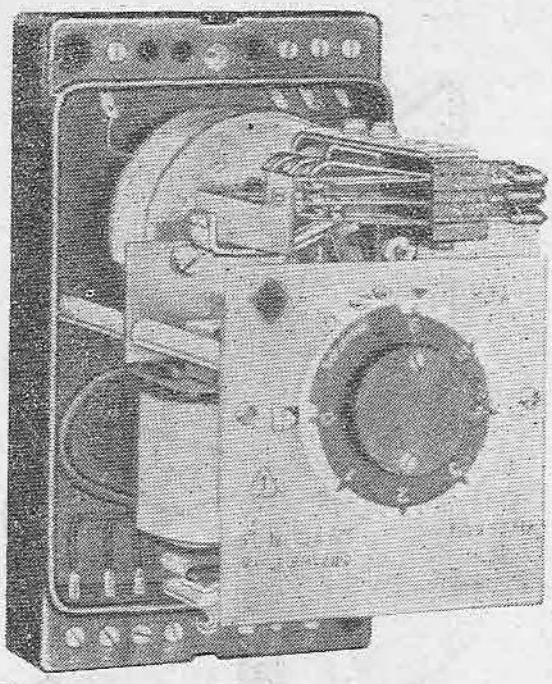


Fig. 9.15. Releu de timp cu temporizare la închidere.

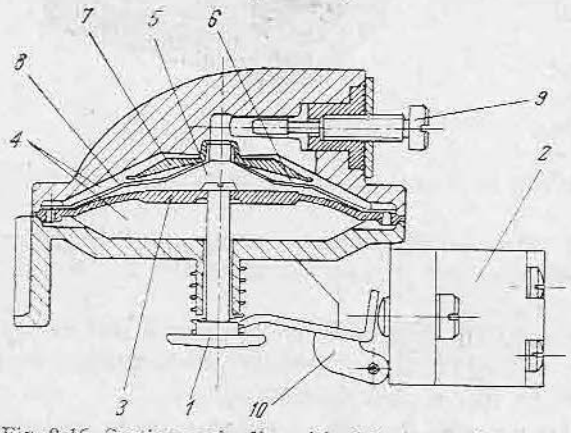


Fig. 9.16. Secțiune prin dispozitivul de temporizare al releului electropneumatic.

Partea superioară a compartimentului *5* este formată dintr-o calotă metalică *8*, pe care sînt practicate orificiile *6*. Trecerea aerului prin orificii este controlată de valva *6*. Reglajul temporizării se face între 0,1 și 60 s, prin șurubul *9* care reglează debitul de aer.

● **Întrerupătoarele automate** alcătuiesc o categorie importantă de aparate electrice combinate pentru comutarea, protecția și comanda motoarelor, transformatoarelor și liniilor electrice.

Întrerupătoarele automate trebuie să rupă curenții de scurtcircuit foarte mari de ordinul zecilor de kA și din această cauză sînt dotate cu dispozitive complexe pentru stingerea arcului. În scopul limitării efectelor curenților de scurtcircuit, declanșarea se face printr-o mișcare rapidă a contactelor mobile; viteza imprimată contactelor mobile este realizată prin resoarte puternice care în poziția anclanșată a aparatului sînt menținute armate printr-un dispozitiv asupra căruia acționează declanșatoarele (releele).

Clasificarea întrerupătoarelor automate se face după:

a) parametrii nominali: tensiune, curent;

b) natura protecțiilor conținute: suprasarcină de durată, scurtcircuit, tensiune minimă și maximă etc.;

c) tipul dispozitivului de acționare: manual, electric, pneumatic;

d) numărul polilor (fazelor): bipolar, tripolar;

e) mediul de protecție al contactelor: ulei, aer;

f) capacitatea (puterea) de rupere;

g) frecvența de conectare: mică, medie, mare.

În țară, la Întreprinderea Electroaparataj, se produc întrerupătoare automate din seria ISOL de 0,4 kV; 100, 250, 500 A, precum și întrerupătoare din seria OTOMAX de 1 000, 2 500 A.

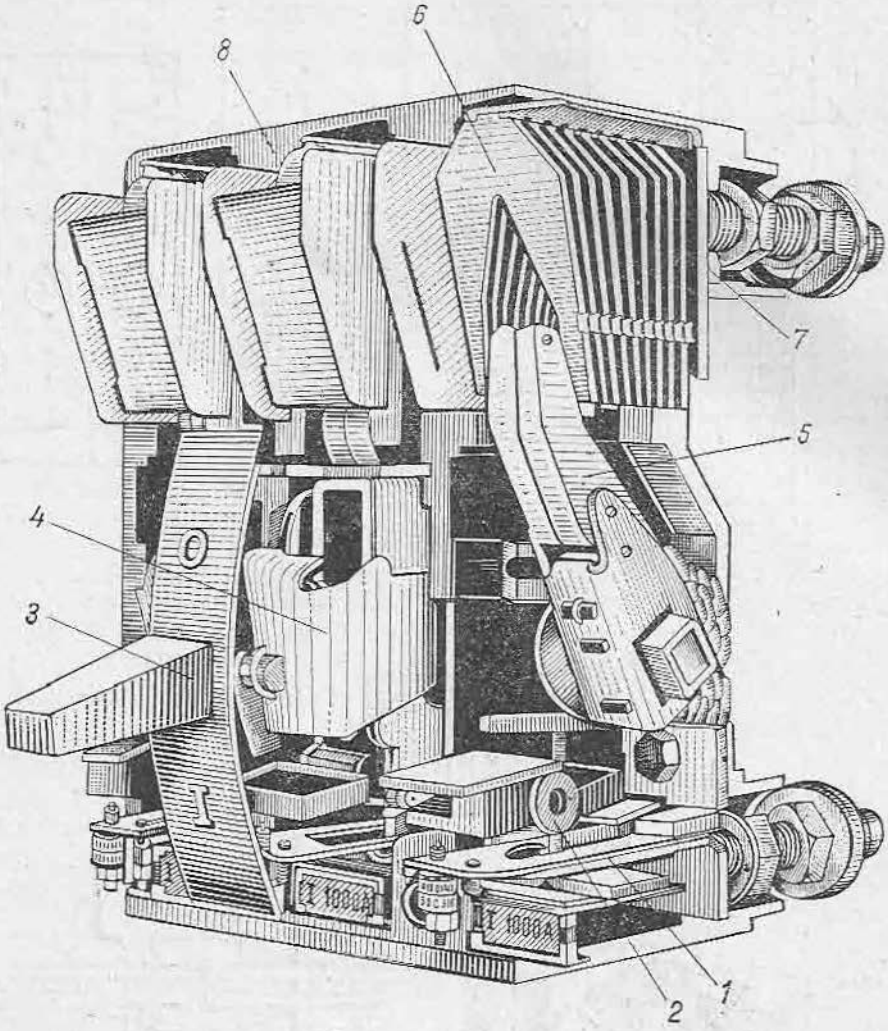


Fig. 9.17. Întrerupător automat din seria ISOL.

În figura 9.17 sînt reprezentate **elementele unui întrerupător automat din seria ISOL** (*1* — releu termic; *2* — axul declanşatorului; *3* — maneta de acţionare; *4* — mecanismul de anclanşare şi declanşare; *5* — contact mobil; *6* — cameră de stingere; *7* — contact fix; *8* — carcasa).

Din schema electrică (fig. 9.18) rezultă modul de legare a unui întrerupător ISOL. Sînt notate: *I* — căile de curent principale; DT_m — bobina declanşatorului de tensiune minimă; *DD* — bobina declanşatorului de deschidere; C_1, C_2 — contactele auxiliare; *O* — butonul de deschidere.

Secţiunea prin întrerupătorul OTOMAX din figura 9.19 permite analizarea construcţiei, cinematicii şi a subansamblurilor aparatului.

Barele de legătură *1* străbat cadrul fix *2* la contactele debroşabile fixe *3*. Căile de curent se continuă prin contactele debroşabile mobile *4* atît la con-

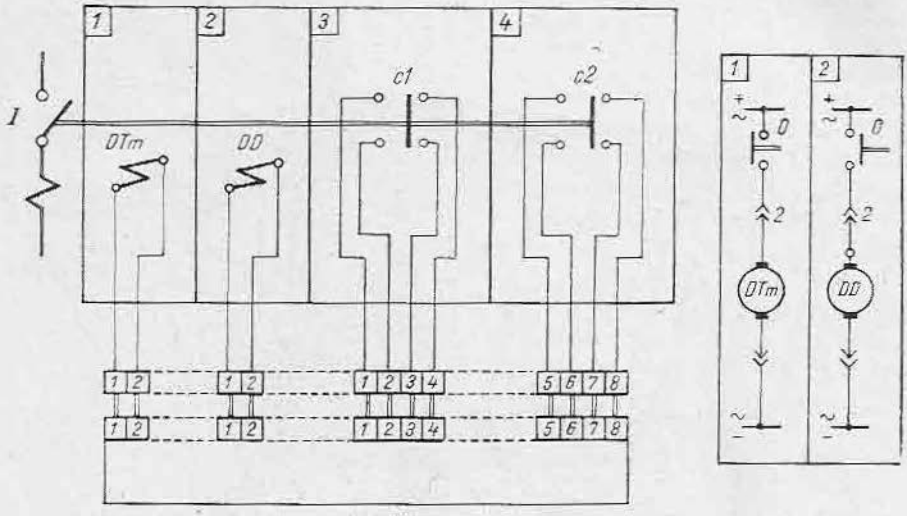


Fig. 9.18. Schema electrică a întrerupătorului automat ISOL.

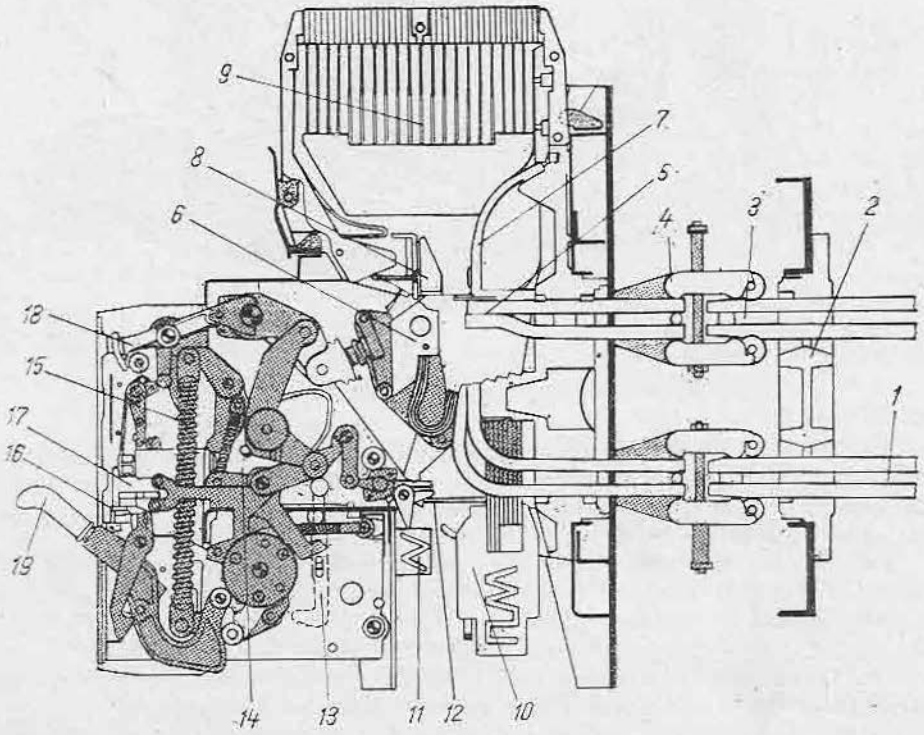


Fig. 9.19. Întrerupător automat din seria OTOMAX (secțiune).

tactele principale fixe *5* și coarnele de suflaj fixe *7*, cît și la contactele principale mobile *6* și coarnele de suflaj mobile *8*.

Un volum important din gabaritul aparatului îl ocupă camerele de stingere *9*, cu plăcuțe deionice.

Maneta de acționare *19* acționează resortul de anclanșare *15* și mecanismul de anclanșare *14*.

Declanșatoarele combinate termice și maximale *10* și declanșatorul de tensiune minimă *11*, acționează asupra axului de declanșare *12*. Dispozitivul de siguranță *13* produce de asemenea declanșarea în cazul în care se execută manevra greșită de a-l introduce sau de a-l extrage în timp ce întrerupătorul automat este anclanșat.

Pe partea frontală se mai găsesc butoanele *16* de anclanșare și declanșare și semnalizatoarele care indică: „resoarte armate" sau „resoarte nearmate" și pozițiile „închis", „deschis".

Acționarea unui întrerupător automat OTOMAX se face în două etape:

— armarea resoartelor printr-o manevră manuală de extragere a manetei și de apăsare în jos pînă se simte agățarea, sau printr-o manevră automată executată de servomotor;

— comanda de închidere-deschidere; comenzile se pot da fie de pe aparat, apăsînd pe butoanele frontale, fie de la distanță prin intermediul electromagneților de comandă; comanda de închidere se poate da numai după apariția semnalizării „resoarte armate" (culoarea galbenă).

La alegerea întrerupătorului automat pentru motorul unei acționări se iau în considerare următoarele mărimi caracteristice:

— *curentul nominal al aparatului* să fie mai mare decît curentul nominal al motorului;

Exemplu: pentru motorul asincron în scurtcircuit de 75 kW, 380 V, 50 Hz, 150 A, se alege ISOL de 250 A.

— *tensiunea de serviciu* sau tensiunea la care sînt conectate bobinele DD și DT_m;

Exemplu: Se presupune că în schema de comandă se folosește 220 V, 50 Hz;

— *frecvența de conectare*;

Exemplu: 25 de conectări pe oră.

— *timpul de anclanșare*;

Exemplu: 100 ms.

— *domeniul de reglare al releelor termice*:

la 20°C : 1 ... 1,25 I_r(I_r — curent de reglaj al releului termic)
la 45°C: 0,8 ... 1 I_s;

Exemplu: pentru motorul de 75 kW, 150 A se aleg relee termice cu I_r = 160 A.

— *domeniul de reglare al releelor electromagnetice:*

5 ... 10 I_r;

Exemplu: pentru motorul asincron în scurtcircuit de 75 kW, 150 A avînd curentul de pornire 7 I_n se vor alege relee electromagnetice reglate la 8 I_n.

Fig. 9.20. Siguranță automată.

— *capacitatea de rupere;*
Exemplu: 5 kA.
— *contactele auxiliare necesare pentru blocaje;*
— *secțiunea minimă a conductoarelor de racord.*

Întrerupătoare monopolare. Receptorii avînd un consum pînă la 25 A (circuite de comandă, motoare mici, circuite de semnalizare) se protejează cu întrerupătoare automate monopolare.

Întrerupătorul automat monopolar este echipat cu releu termic și electromagnetic. Se poate folosi și pentru protecția, schemelor de acționare electrică, permițînd o reanclanșare comodă.

Întrerupătorul automat monopolar se montează pe șină; prevăzut cu filet, el se întîlnește sub denumirea de *siguranță automată* (fig. 9.20).

● **Întreținerea și repararea aparatelor automate.** Contactoarele de forță și de comandă, întrerupătoarele automate nu necesită operații de întreținere în condiții normale de funcționare.

Pentru aparatele de forță, după fiecare scurtcircuit se examinează contactele și camerele de stingere. Dacă contactele sînt perlate, se curăță cu o pilă fină sau hîrtie abrazivă, îndepărtînd pilitura metalică de pe piesele izolate. Camerele de stingere, care prezintă urme pronunțate de topire și carbonizare se înlocuiesc.

La intervale de timp sau după un număr de manevre stabilit de instrucțiunile de exploatare se execută următoarele operații de întreținere:

— părțile metalice și părțile izolante se curăță cu o cîrpă sau o perie uscată și curată;
— se înlătură praful și umiditatea din interiorul camerelor de stingere;
— contactele se curăță cu o cîrpă muiată într-un solvent.

Pentru întrerupătoarele automate acționate cu motor:

— colectorul se curăță cu o cîrpă muiată într-un solvent;
— înfășurările, se curăță eliminînd depunerile de pulberi cu un jet de aer uscat;
— se verifică starea de uzură a periilor și eventual se înlocuiesc.

Declanșările incorecte sub sarcină nominală ale întrerupătoarelor automate pot fi provocate de reglarea necorespunzătoare a releelor electromagnetice; în acest caz se corectează reglarea releelor.

Reparațiile se execută numai prin înlocuirea pieselor defecte cu piese de schimb noi.

Pentru comandarea pieselor de schimb se indică denumirea aparatului și codul, denumirea și numărul de desen al piesei. Pentru bobine se indică în plus subansamblul din care fac parte, precum și tensiunea și frecvența.

D. APARATE DE PORNIRE, REGLARE, FRÎNARE ȘI AUTOMATIZARE

Aparatele de pornire și reglare se folosesc la pornirea și reglarea vitezei de rotație a motoarelor electrice. Din această grupă fac parte: comutatoarele stea-triunghi, inversoarele de sens, comutatoarele numărului de poli, contro-

lerele pentru circuite principale și secundare, reostatele de pornire și reglaj și rezistențele.

● **Comutatoarele stea-triunghi** se folosesc la pornirea motoarelor electrice asincrone cu rotorul în scurtcircuit, pentru reducerea curentului absorbit la pornire. Trecerea din poziția stea în poziția triunghi se face manual, după un timp lăsat la alegerea manevrantului. Comutatoarele stea-triunghi se construiesc cu contacte în aer de 25 A și 63 A sau în ulei de 100 A și 200 A. Pozițiile de funcționare sînt: zero, stea și triunghi. Manevra directă dintre pozițiile zero și triunghi este blocată.

Comutatoarele se folosesc pentru motoarele care au tensiunea nominală a înfășurării statorului conectat în triunghi, egală cu tensiunea rețelei.

În figurile 9.21 și 9.22 sînt prezentate o secțiune printr-un comutator stea-triunghi și respectiv schema de legături.

Contactele mobile *1* sînt despărțite prin pereții izolanți *2*.

Contactele fixe *3* sînt amplasate pe placa de bachelită *4*.

Cama de sacadare *5* și contactele mobile *6*, montate coaxial, sînt acționate în interiorul carcasei din tablă *7*, cu maneta *8*. Cablurile se racordează la contactele mobile prin presetupele *9*. Pereții laterali *10* completează carcasa aparatului care are un grad de protecție IP 300. Indicatorul *11* se oprește în dreptul pozițiilor marcate 0 (zero), λ (stea) și △ (triunghi).

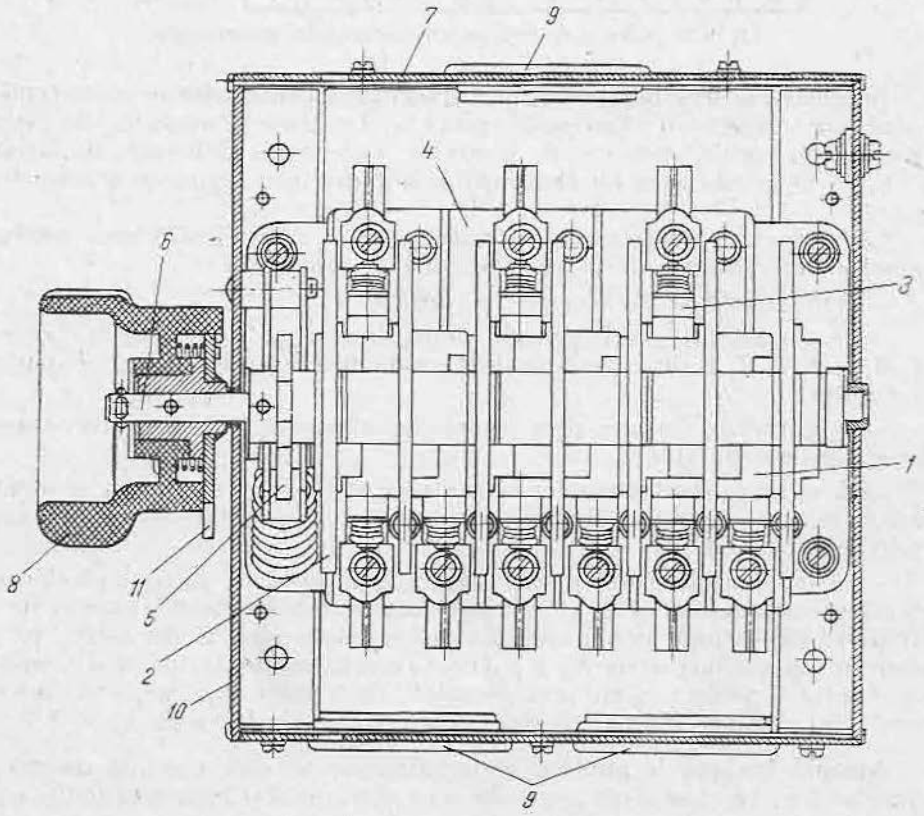
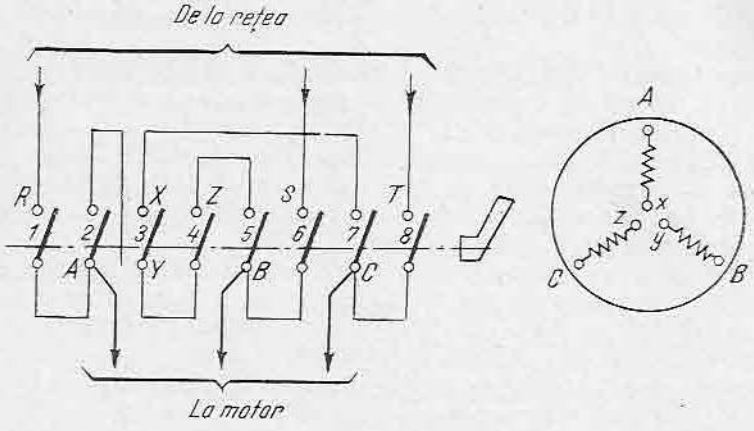


Fig. 9.21. Comutator stea-triunghi.



	1	2	3	4	5	6	7	8
0			●	●				
⅄	●		●	●		●		●
Δ	●	●			●	●	●	●

Fig. 9.22. Schema de legături a comutatorului stea-triunghi.

În schema de legături și pe diagrama închiderii contactelor se poate urmări succesiunea realizării funcțiunii propuse. Deoarece comutatoarele stea-triunghi nu conțin elemente de protecție, între rețea și bornele de intrare R, S, T, se intercalează un întrerupător automat sau siguranțe și relee termice.

La montarea comutatorului stea-triunghi se face identificarea conductoarelor din cablurile de legătură după cum urmează:

— comutatorul se manevrează pe poziția 0;

— se racordează conductoarele dintre motor și comutator la bornele A, B, C și X, Y, Z ale comutatorului; conductoarele se lasă libere de partea motorului;

— se introduce tensiune prin bornele de intrare R, S, T și se trece comutatorul pe poziția stea;

— la capetele conductoarelor ce urmează să fie legate la motor se identifică cu lampa de control 4 și se marchează cu tile înscrise cu cerneală, conductoarele A, B, C;

— se trece comutatorul pe poziția triunghi, apoi cu un fir al lămpii de probă pe conductorul A se ating conductoarele nemarcate cu al doilea fir — lampa rămîne stinsă numai cînd este atins conductorul Z (în același fel se identifică și conductoarele X, Y). După racordarea conductoarelor la motor se execută o pornire cu motorul decuplat; dacă motorul pornește în sens invers celui dorit se inversează două conductoare ale bornelor R, S, T.

Atenție! Înainte de punerea în funcțiune se verifică execuția corectă a conexiunilor, blocajul dintre pozițiile zero și triunghi și legarea la centura de protecție a carcasei aparatului.

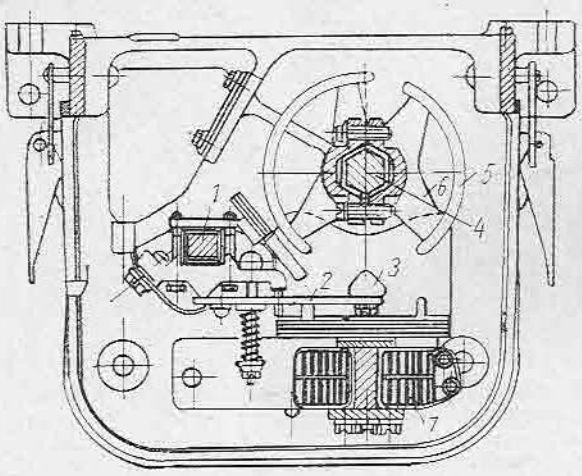


Fig. 9.23. Controler pentru circuite principale (secțiune).

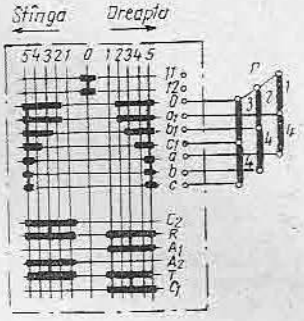


Fig. 9.24. Diagrama contactelor și racordarea unui controler la rezistențe.

● **Controlerele** se folosesc pentru conectarea și comutarea circuitelor de forță și de comandă. În funcție de curenții pe care îi comută, controlerele se împart în două categorii: *controlere pentru circuite principale* și *controlere pentru circuite secundare*.

Controlerele pentru circuite principale, racordate la cutii cu rezistențe, se folosesc pentru pornirea și reglarea vitezei motoarelor electrice, pentru curenți pînă la 100 A. Se deosebesc două tipuri constructive: *cu tambur* și *cu came*. Toate controlerele se construiesc în execuție protejată cu carcase demontabile, care împiedică atingerea părților sub tensiune.

În secțiunea din figura 9.23 se poate distinge tija izolantă *1*, pe care sînt fixate lamelele elastice *2* și contactele din cupru *3*. Axa de comandă izolată *4* are fixată pe ea portsegmenții din fontă *6*, pe care sînt prinși segmenții din cupru *5*. Segmenții formează contactele mobile. Pentru ruperea arcului care se formează în c.c. se prevăd bobine de suflaj. În figura 9.24 este reprezentată diagrama contactelor cu legăturile executate pentru șuntarea unor rezistențe. Bornele *11* și *12* de pe poziția *0* sînt folosite de obicei pentru circuitul de tensiune minimă al întreruptorului automat de protecție generală. Plecînd din *0* spre dreapta, pe poziția *2*, bornele *o* și a_1 scurtcircuitează rezistența r_1, pe poziția *3*, bornele *o* — b_1 scurtcircuitează rezistența r_2, iar pe poziția *4*, bornele *o* — c_1, scurtcircuitează rezistența r_3; pe poziția *5* sînt scurtcircuitate rezistențele r_4. Revenind din poziția *5* spre *0*, rezistențele se introduc în circuit în ordine inversă. În direcția stînga, succesiunea este aceeași ca în direcția dreapta.

Contactele din partea inferioară a diagramei sînt folosite pentru circuitele de comandă.

Controlerele pentru circuite principale au o construcție similară cu aceea a controlerelor pentru circuite secundare și pot fi folosite în acționări cu frecvențe pînă la 600 conectări pe oră.

Deficiența controlerelor pentru circuite principale sînt gabaritele relativ mari și o întreținere dificilă a contactelor, care se uzează repede.

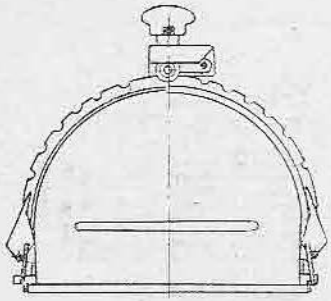


Fig. 9.25. Controler pentru circuite secundare (vedere laterală).

	Poziția de acționare						
	Stînga			0	Dreapta		
	3	2	1		1	2	3
	Poziția contactelor						
CD_1				X			
CS_1	X	X	X		X	X	X
CD_2					X	X	X
CS_2	X	X	X				
CD_3	X	X				X	X
CS_3	X						X

Fig. 9.26. Diagrama contactelor unui controler pentru circuite secundare.

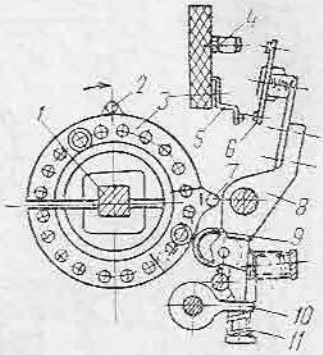


Fig. 9.27. Aparat de comandă a cursei.

Controlerele pentru circuite secundare se folosesc pentru comanda și comutarea unor puteri mari, cu aparate de gabarit redus. Contactele controlerelor pentru circuite secundare sînt dimensionate pentru curenți de 10 A și comandă circuitele de forță indirect, prin intermediul contactoarelor de comandă.

În figurile 9.25 și 9.26 sînt reprezentate vederea laterală și diagrama contactelor unui **controler pentru circuite secundare.** Din figură se observă comanda prin manetă și degajările pentru pozițiile de acționare. Conform diagramei, controlerul are șase contacte, o poziție de zero și cîte trei poziții în dreapta, respectiv stînga. Închiderea contactelor este marcată prin semnul X.

Controlerele pot fi construite și cu revenire automată a manetei pe poziția zero, în care caz sînt prevăzute cu resoarte speciale.

Aparatul de comandă a cursei este o variantă a controlerului pentru circuite secundare.

Acest aparat se conectează la reductorul mecanismului de execuție și în funcție de unghiul de rotire, dă impulsuri de comandă. Axa aparatului se poate roti continuu și pe ea se asamblează fie o serie de discuri cu un anumit profil standard și într-o anumită succesiune, fie o serie de discuri pe care se pot fixa came.

În figura 9.27 se arată modul de funcționare a unui *aparat de comandă a cursei, prevăzut cu discuri și came.* Pe axa *1* se montează discuri asamblate din cîte două elemente *3.* Fiecare disc este prevăzut cu găuri pentru fixarea a două came *2* și *7.* Contactele fixe sînt *4* și *5* și sînt scurtcircuitate de puntea mobilă *6,* acționată de pîrghia *8.* Sensul de rotație fiind cel indicat de săgeată, cama *7* împinge rola *9* care acționează pîrghia și o înclichetează cu zăvorul *10* menținut de resortul *11.* Contactul rămîne închis pînă cînd cama *2* împingînd rola produce desclichetarea și deschiderea contactului. În funcție de unghiul făcut de came se stabilește durata închiderii contactelor.

În diagrama din figura 9.28 contactul *1* închis în sensul de rotație dreapta este deschis de cama fixată în dreptul găurii *12* (triunghiul superior) și este reînchis de cama fixată în dreptul găurii *14* (triunghiul inferior). Pentru contactul *2* există trei came din care aceea fixată în dreptul găurii *15* nu acționează decît la deschidere și numai în direcția stînga.

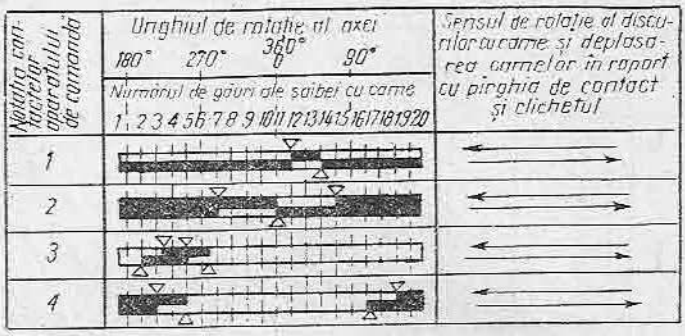


Fig. 9.28. Diagrama închiderii contactelor unui aparat de comandă a cursei.

Schimbarea sensului de rotație modifică diagrama de închidere a contactelor, fapt de care trebuie să se țină seama la fixarea camelor pentru funcționarea în ambele sensuri.

● **Reostatele** sînt aparate folosite pentru pornirea și reglarea turației motoarelor electrice. Reostatele se compun dintr-un element de comutare și o rezistență, asamblate într-o carcasă comună, cu răcire în aer sau ulei.

Elementul de comutare este fie de tip controler, fie cu ploturi asigurîndu-se condiții optime pentru comutarea curenților la trecerea de pe o treaptă de rezistență, pe o altă treaptă de rezistență.

Rezistența este bobinată din sîrmă de cromnichel fixată pe izolatoare de porțelan sau din elemente din fontă sau tablă silicioasă asamblate pe bare metalice izolate cu micanită.

Elementul de comandă îl constituie o manetă sau un volan de manevră.

Atenție! Se construiesc reostate de pornire și reostate de pornire și reglare. Reostatele de pornire se folosesc exclusiv pe durata pornirii, un timp limitat la circa 30 s.

Reostatele de pornire și reglare se folosesc atît pe durata pornirii, cît și în timpul funcționării pentru reglarea vitezei.

Reostatele cu rezistențe metalice sînt elemente pentru reglare discontinuă, în trepte și se construiesc pentru motoare de curent alternativ cu rotor bobinat cu puterea pînă la 160 kW și pentru circuitele de excitație ale mașinilor de curent continuu.

În figura 9.29 se prezintă schema electrică a unui reostat de pornire pentru un motor de curent continuu.

Reostatele cu lichid constituie o categorie aparte de aparate construite de asemenea, fie pentru pornirea, fie pentru pornirea și reglarea vitezei motoarelor asincrone cu rotor bobinat cu puteri de 250 kW și mai mari.

Reostatele cu lichid au rezistența constituită dintr-un electrolit. Variația rezistenței se obține prin imersia electrozilor în electrolit; comanda ridicării și coborîrii electrozilor se face cu un servomotor prin comenzi locale sau de la distanță. Disipările mari de căldură care apar în reostatele cu lichid necesită o pompă pentru recircularea electrolitului și de asemenea un circuit de răcire forțată cu apă care intră automat în funcțiune prin termostat.

Spre deosebire de reostatele cu rezistențe metalice, reostatele cu lichid sînt elemente cu reglare continuă.

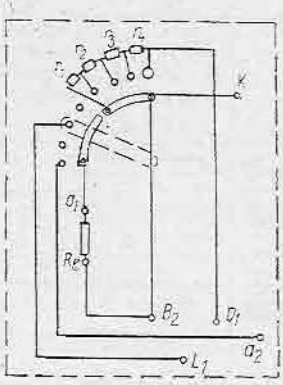


Fig. 9.29. Reostat de pornire pentru motor de c.c. (schema electrică).

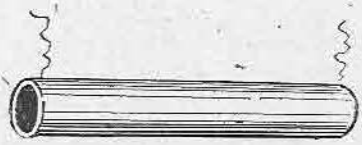


Fig. 9.30. Rezistența tubulară.

● **Rezistențele** sînt aparate folosite pentru pornirea, reglarea și frînarea motoarelor de curent alternativ și continuu. În figura 9.30 este reprezentată o rezistență tubulară, care poate servi la pornirea motoarelor mici pînă la 2 kW, sau ca rezistență suplimentară în circuitele de semnalizare.

Rezistențele tubulare se execută din material cu rezistivitate înaltă, constantan sau cromnichel și, după înfășurare pe tubul ceramic, se acoperă cu email.

Pentru motoare cu puteri pînă la 10 kW se folosesc cutii cu **elemente de rezistență din sîrmă** (fig. 9.31). Fiecare element se compune dintr-o placă de oțel prevăzută cu degajări pentru asamblarea în cutie. Muchiile plăcii sînt acoperite cu izolatoare ceramice canelate pe care se înfășoară sîrma. Pentru motoare cu putere mai mare de 30 kW se folosesc cutii de rezistențe din fontă (fig. 9.32) sau din tablă silicioasă.

Elementele se asamblează pe tije izolate cu mică. Între elemente se pot introduce șaibe conductoare sau izolante, pentru înseriere și realizarea valorilor de rezistență necesare.

● **Frînele** sînt dispozitive folosite pentru controlul opririi mecanismelor acționate. La ridicarea unei sarcini, frîna trebuie aplicată instantaneu pentru a se evita autocoborîrea. La utilaje cu moment mare de inerție, frînele

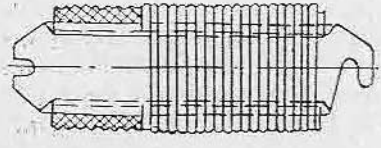


Fig. 9.31. Element de rezistență din sîrmă.

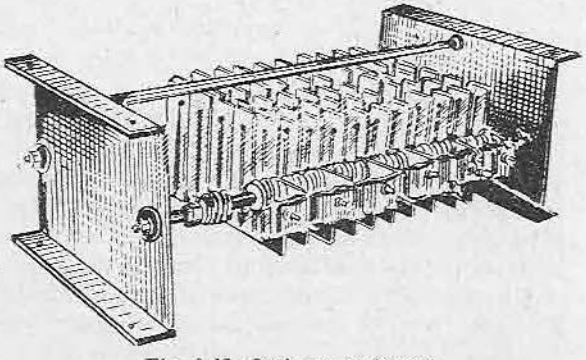


Fig. 9.32. Cutie cu rezistențe.

asigură oprirea la punct fix. După curentul pe care îl folosesc, frînele sînt *de curent continuu* și de *curent alternativ monofazat* sau *trifazat*. După elementul de acționare, frînele pot fi cu *electromagnet* sau cu *electromotor*.

Mărimile caracteristice care definesc o frînă sînt următoarele:

— *forța nominală de atracție* sau *forța maximă exercitată de armătura mobilă la o distanță egală cu cursa nominală*;

— *cursa nominală* sau drumul maxim parcurs la sarcina nominală;

— *frecvența nominală* sau numărul de conectări pe oră pentru toate condițiile nominale;

— *tensiunea nominală, frecvența de acționare* (sau numărul de conectări pe oră);

— *durata de acționare*.

● **Electromagneții de frînă** pot fi: *cu tragere, cu împingere, cu tragere și împingere*. În construcțiile obișnuite se prevede folosirea unui electromagnet pentru eliberarea tamburului de frînă, adică pentru slăbirea saboților sau a benzii de frînare atunci cînd înfășurarea este parcursă de curent. După deconectarea electromagnetului se produce frînarea sub acțiunea unor resoarte care strîng saboții sau banda.

În figura 9.33 este reprezentat un *electromagnet monofazat de curent alternativ pentru frînare tip tambur*. Saboții *1* sînt apăsați pe tamburul *2*, de resortul *3*. Sub acțiunea electromagnetului *4*, pîrghia *5* acționează asupra saboților, depărtîndu-i.

Un *electromagnet solenoidal cu cursa lungă* (fig. 9.34) se compune dintr-un cilindru *1*, în care este amplasată bobina *2*, și armătura mobilă *3*. Armătura mobilă glisează în ghidajul nemagnetic *4* și este executată cu precizie înaltă, deoarece servește și ca piston de aer pentru atenuarea șocurilor la acționare. Șurubul de amortizare *5*, din capacul electromagnetului *6*, reglează orificiul de comunicație cu exteriorul. Armătura este atrasă, la excitare, în sus, iar la deconectare coboară sub acțiunea greutății.

Fiecare electromagnet este caracterizat printr-o diagramă forță-cursă. În figura 9.35 este redată diagrama forță-cursă pentru un electromagnet de 2,5 N, 12 mm.

● **Electromagneți pentru poduri rulante.** Electromagneții pentru podurile rulante se folosesc pentru transportul economic al fierului vechi, lingourilor,

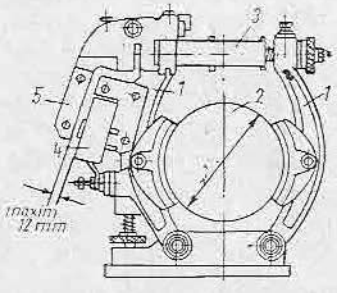


Fig. 9.33. Electromagnet de frînă, tip tambur.

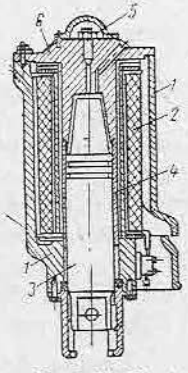


Fig. 9.34. Electromagnet de frînă solenoidal.

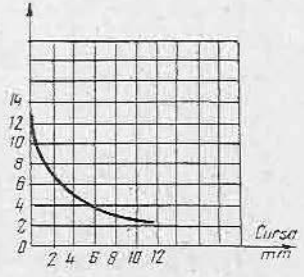


Fig. 9.35. Diagrama forță-cursă.

bramelor, țaglelor și al plăcilor din tablă groasă. Temperatura materialelor transportate trebuie să nu depășească 150°C.

Electromagneții sînt alimentați în curent continuu de la grupuri convertizoare rotative sau statice, montate pe pod. Forma constructivă a suprafeței portante este rotundă sau dreptunghiulară.

Capacitatea de ridicare a electromagnetului depinde de forma și compoziția materialului ridicat. De exemplu, un electromagnet dimensionat pentru o putere de 8 kW la $DA = 40\%$, poate ridica un lingou de 20 t, dar numai 1,5 t bucăți de oțel și 0,5 t bucăți de fontă.

● **Aparatele de automatizare** folosite în acționările electrice, formează o categorie cu diversitate foarte mare, din care sînt menționate în cele ce urmează: butoanele, cheile de comandă, lămpile de semnalizare și limitatoarele de cursă.

Butoanele se *folosesc în instalațiile electrice pentru darea impulsurilor de comandă.*

Pot fi prevăzute unul sau mai multe grupuri de contacte de tip punte, normal deschise sau normal închise.

Ca variante constructive există: *butoane pentru montaj aparent* și *butoane pentru montaj îngropat.*

După numărul de elemente de acționare există *butoane simple, duble, multiple.*

Seria de butoane pentru mașini-unelte fabricate în țară poate comanda circuite de curent alternativ pînă la 380 V și 2 A și de curent continuu pînă la 220 V și 0,25 A. Elementul comun al seriei îl constituie ansamblul de contacte, două normal deschise și două normal închise.

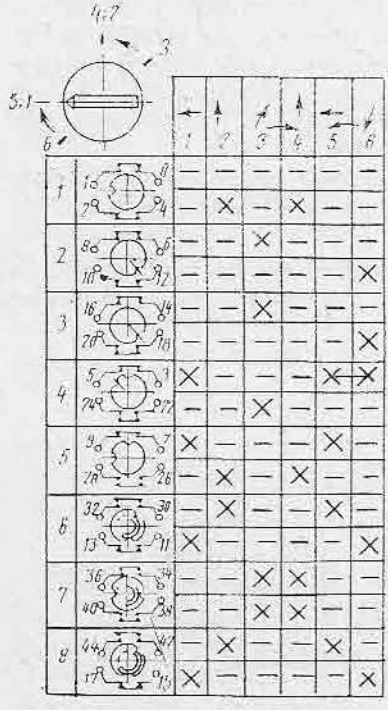


Fig. 9.36. Diagrama închiderii contactelor unei chei de comandă.

Butonul manipulator este un aparat care permite concentrarea comenzilor; prin acționarea unei pîrghii în patru direcții la 90° se dau impulsuri de comandă. Se execută în două variante, cu poziții reținute sau cu revenire.

Cheile de comandă sînt *similare întreruptoarelor, dar curentul nominal este sub* 6A.

În figura 9.36 se reprezintă diagrama închiderii contactelor unei chei de comandă cu 8 etaje. Pe rîndul superior, în stînga pe periferia cercului sînt marcate șase poziții; săgețile indică faptul că pozițiile *3* și 6 sînt poziții de impuls, cu revenire. În continuare, în cele șase casete, se indică numărul de ordine al poziției și direcția cheii, iar în coloanele respective, contactele care se închid.

Din prima coloană stînga se observă că sînt 8 discuri, iar în a doua coloană stînga se marchează bornele contactelor.

Lampa de semnalizare *indică situațiile normale sau de avarie din instalația supravegheată.*

Se execută în mai multe variante constructive: lămpi normale cu transformator sau casete. Geamul poate fi diferit colorat.

Lămpile sînt cu *filet* sau *cu baionetă*. Pentru comenzi locale se construiesc cutii cu butoane, lămpi sau chei de comandă cu lampă inclusă.

● **Limitatoarele de cursă** sînt aparate cu contacte, acționate de un element aparținînd organului de execuție și sînt folosite în instalațiile de automatizare.

Criteriile de clasificare ale limitatoarelor de cursă sînt următoarele:

— curentul comutat: principal pînă la 60 A, sau secundar pînă la 6 A;

— mediul în care lucrează contactele: aer, ulei sau vid;

— poziția de fixare a contactelor după acționare și retragerea elementului de execuție: cu revenire sau cu reținere;

— modul de execuție al ansamblului (contacte, carcasă, elemente de transmisie ale mișcării): normală sau grea;

— modul de acționare: cu pîrghie, cu șurub, cu furcă, cu buton etc.

Limitatoarele de cursă cu buton realizează comutarea contactelor prin apăsarea butonului sau a capătului tijei care poartă contactele mobile și care se deplasează axial (fig. 9.37).

Limitatoarele de cursă cu pîrghie se folosesc pentru limitarea organelor de mașini în mișcare; acționarea se face prin deplasarea unei pîrghii prevăzute cu o rolă; acționarea contactelor rezultă din cinematica transmisiei, fie prin deplasare axială, fie prin rotație (fig. 9.38).

Limitatoarele de cursă cu șurub se folosesc pentru limitarea cursei organelor de mașini în mișcare de rotație; axul limitatorului se cuplează mecanic cu un ax al reductorului mecanismului.

Mișcarea de rotație se transmite unui ax filetat, pe care se deplasează axial (între ghidaje) piesa care acționează contactele electrice. Fiecare contact este acționat succesiv, după un număr de rotații ale axului filetat.

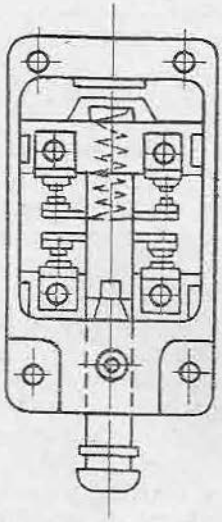


Fig. 9.37. Limitator de cursă cu buton.

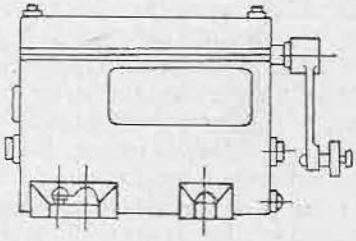


Fig. 9.38. Limitator de cursă cu pîrghie pentru macarale.

Cursa axială a piesei care acționează contactele se realizează de obicei în maximum 20 rotații, la care se adaugă două rotații în gol, după deschiderea contactelor.

Numărul de rotații necesare pentru acționarea unui contact poate fi prestabilit cu ajutorul a două șaibe care se fixează pe axul filetat și care delimitează cursa axială a piesei care acționează contactele.

Limitatoarele de cursă magnetice se compun dintr-o carcasă în formă de furcă, în ale cărei brațe sînt montate respectiv un contact „trestie" și un magnet permanent.

Contactul „trestie" este un microcontact capsulat sub vid într-un tub de sticlă. Sub acțiunea magnetului permanent contactul se găsește în mod normal acționat.

Comutarea limitatorului magnetic se produce cînd o piesă lamelară, cu rol de ecran magnetic și care este fixată pe un organ de execuție, se deplasează între brațele furcii; în acest caz acțiunea cîmpului exercitată de magnet asupra contactului „trestie" încetează, iar contactul comută.

Acest tip de limitator nu are elemente mecanice de transmisie, ceea ce reduce uzura mecanică exclusiv la durata de viață a contactului „trestie".

Limitatoarele de cursă magnetice se folosesc la ascensoare pentru înregistrarea trecerilor prin dreptul etajelor și în construcția mașinilor-unelte.

Limitatoarele de cursă magnetice au o execuție etanșă, protecție IP56 și o durată de viață foarte ridicată, de ordinul $50 \cdot 10^6$ cuplări.

● **Repararea aparatelor de pornire, reglare, frînare și automatizare.** Comutatoarele stea-triunghi, inversoarele de sens, comutatoarele numărului de poli, controlerele, reostatele cu rezistențe, butoanele și limitatoarele de cursă au în comun contactele electrice la care se înregistrează și cele mai multe dintre defectele acestor aparate.

La întreținerea corectă a contactelor se urmărește în general păstrarea suprafețelor de contact șlefuite, curățarea cu solvent și ungerea cu vaselină neutră; contactele cu uzură pronunțată se înlocuiesc cu contacte de rezervă originale.

De asemenea se verifică cu dinamometrul presiunea pe contacte, care trebuie să aibă valori cuprinse între 20—25 gf/A. Un aparat avînd curentul nominal de 25 A va trebui să prezinte la controlul cu dinamometrul o presiune cuprinsă între 20 gf/A $\times$ 25 A = 500 gf și 25 gf/A $\times$ 25 A = 625 gf.

Rezistențele de pornire și reglaj se distrug prin supraîncălzire; pentru repararea rezistențelor, se identifică elementul defect după care se înlocuiește cu un element original.

La ridicătoarele de frînă electrohidraulice o atenție deosebită se va acorda verificării uleiului care asigură transmiterea forței: menținerea nivelului și respectarea gradului de viscozitate indicat de producător.

Atît la electromagneții de frînă cît și la ridicătoarele de frînă electrohidraulice, arderea înfășurărilor din circuitele electromagnetice este o consecință a unor defecțiuni mecanice care trebuie depistate și remediate concomitent cu defecțiunile electrice.

În lucrările de întreținere curentă se înscrie și curățarea periodică a amplasamentelor aparatelor prin absorbție cu aspiratorul de praf; în cazul suflării cu aer comprimat, există pericolul atingerii unui rezultat opus celui urmărit, prin introducerea prafului în interiorul carcaselor de protecție.

E. APARATE CU DESTINAȚIE SPECIALĂ

În categoria aparatelor speciale, se prezintă cîteva aparate care se folosesc în instalațiile de acționări electrice și care indică tendința de diversificare și specializare a echipamentelor electrice industriale.

● **Întrerupătorul de avarie cu funie.** Întrerupătorul de avarie cu funie se montează de-a lungul transportoarelor cu bandă pentru a permite personalului de exploatare și întreținere să comande o oprire urgentă, din toate punctele de acces la utilaj.

Aparatul este prevăzut cu un sistem de contacte acționate din exteriorul unei carcase în execuție IP542, printr-o pîrghie (fig. 9.39). Pîrghia este rotită prin tragerea unui cablu de oțel dispus de-a lungul transportorului.

După o acționare de avarie, pîrghia rămîne blocată și indică personalului de intervenție localizarea opririi de avarie. Deblocarea se realizează printr-o manetă, amplasată lîngă pîrghia de acționare.

Distanța maximă între două aparate este de 80 m. Întrerupătorul de avarie cu funie este un aparat pentru protecția muncii, a cărui bună funcționare este obligatorie pentru toate transportoarele cu bandă.

● **Supraveghetorul de turație electromagnetic.** Supraveghetorul de turație este un aparat folosit pentru frînarea în contracurent a mecanismelor, pentru controlul funcționării transportoarelor cu bandă, la patinare sau la ruperea benzii. La frînarea în contracurent trebuie sesizată micșorarea vitezei pînă aproape de zero, cînd devine obligatorie declanșarea alimentării înaintea opririi; în caz contrar există pericolul ca mecanismul să se oprească și să pornească în sens contrar.

La pornirea transportoarelor cu bandă se produce uneori patinarea benzii pe tamburul de antrenare, fenomen însoțit de încălzirea și ruperea benzii de cauciuc. Ruperea se poate produce și în timpul funcționării datorită uzurii înaintate. În aceste situații motorul de antrenare al transportorului trebuie deconectat pentru a preîntîmpina avarii mai grave.

În figura 9.40 este redată principial construcția supraveghetorului de turație; mișcarea de rotație a mecanismului este transmisă printr-un ax pe care este montat un magnet permanent *1*. Magnetul se rotește într-un cilindru *2*,

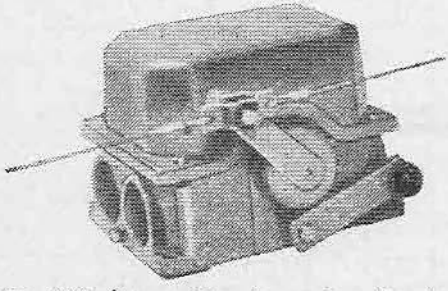


Fig. 9.39. Întrerupător de avarie acționat cu funie.

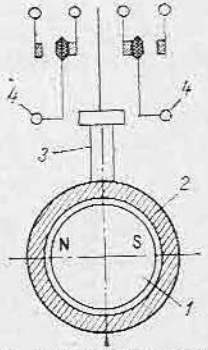


Fig. 9.40. Supraveghetor de turație electromecanic.

pe care se află o înfășurare în scurtcircuit; pîrghia *3* este solidară cu cilindrul *2*. În timpul funcționării mecanismului, din interacțiunea dintre cîmpul magnetic al magnetului permanent și cîmpul indus în înfășurarea în scurtcircuit, rezultă o deplasare a cilindrului în sensul rotației. Ca rezultat, pîrghia acționează unul din contactele *4*.

La frînare, cînd viteza se reduce foarte mult, interacțiunea cîmpurilor devine neglijabilă, pîrghia revine în poziția inițială, și contactul se comută. Supraveghetoarele de turație folosite pentru controlul integrității benzii se livrează cu un ax prelungit, la capătul căreia este montată o rolă antrenată nemijlocit de bandă.

● **Supraveghetorul de turație în funcție de frecvență.** Supraveghetorul de turație în funcție de frecvență este un aparat static, care funcționează numai pe baza unor mărimi electrice, fără cuplaj mecanic cu utilajul acționat.

Aparatul este folosit pentru deconectarea motorului asincron cu inele înaintea opririi, la frînare prin contraconectare.

Principiul de funcționare are la bază relația din frecvența curentului rotoric f_2, frecvența curentului statoric f_1 și alunecarea s:

$$f_2 = f_1 s.$$

Se observă că la oprire $s = 1$; frecvențele curenților statoric și rotoric sînt egale. În figura 9.41 este redată schema bloc a aparatului; m_2 este un transformator de alimentare a circuitelor interioare. Bornele *1* și *2* se racordează la rotorul motorului. Tensiunea rotorică este transformată cu ajutorul diodelor tunel într-un semnal trapezoidal care este transmis prin transformatorul m_1 la etajul inversor N. Panta semnalului trapezoidal este ridicată astfel ca la intrarea în etajul de întîrziere T să poată fi considerat ca un semnal dreptunghiular. Cu ajutorul reostatelor r se stabilește o turație, respectiv frecvența de blocare. În blocul de întîrziere se efectuează comparația dintre durata semnalului cu frecvența rotorică și cea a semnalului de blocaj; etajul K este basculat numai pentru o frecvență apropiată de 50 Hz, care apare în rotor înainte de oprire. Prin etajul de putere P este acționat releul d_1 care comandă oprirea motorului

Atenție! Supraveghetorul de turație în funcție de frecvență se conectează la tensiunea rotorică numai pe durata contraconectării.

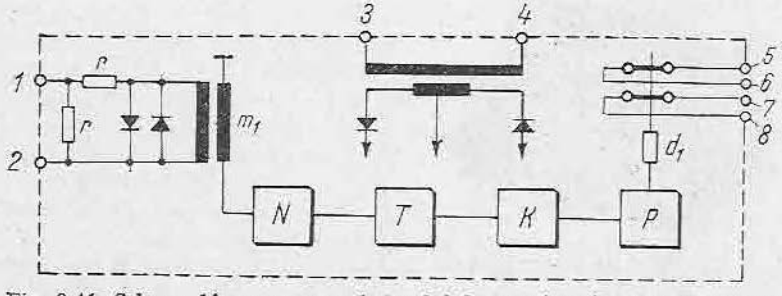


Fig. 9.41. Schema bloc a supraveghetorului de turație în funcție de frecvență.

F. ANSAMBLURI STATICE PENTRU ALIMENTAREA ACȚIONĂRILOR ELECTRICE

O tendință a producătorilor de echipament pentru acționările electrice constă în fabricarea unor serii de ansambluri preuzinate, pentru alimentarea seriilor standard de motoare electrice.

Factorul care a promovat această dezvoltare îl constituie larga răspîndire a **elementelor statice** *(transductoarele, mutatoarele* ș.a.). Elementele statice ocupă un spațiu redus, astfel încît realizarea unui ansamblu de alimentare pentru un motor se obține în gabaritul unui dulap cu aparataj.

● **Transductorul** este o reactanță saturabilă formată din *miez magnetic* și *înfășurare electrică;* se comportă ca un generator de tensiune variabilă sau ca un transformator cu impedanță variabilă. **Amplificatorul magnetic** cuprinde un transductor înseriat cu redresorul care blochează unul din cele două sensuri de trecere a curentului.

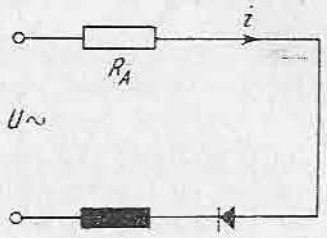


Fig. 9.42. Circuit simplificat cu transductor.

Tensiunea la bornele sarcinii depinde de gradul de saturare al reactanței. Tensiunea minimă depinde de curentul de magnetizare remanent, iar tensiunea maximă depinde de căderea de tensiune pe impedanța de sarcină și pe redresor.

Se construiesc dulapuri cu aparataj cu transductoare pentru:

— alimentarea cu tensiune variabilă, a indusului motorului de c.c.;

— alimentarea reglabilă a înfășurării de excitație a motorului și generatorului de c.c.;

— alimentarea cu tensiune variabilă a statorului motorului de c.c.;

— realizarea de impedanțe reglabile în rotorul motorului de c.a.

Principiul de funcționare a transductorului este explicat pentru circuitul simplificat din figura 9.42. În stare nesaturată, de la t_0 la t_1 pe diagrama din figura 9.43, tensiunea și fluxul cresc, iar curentul rămîne practic zero.

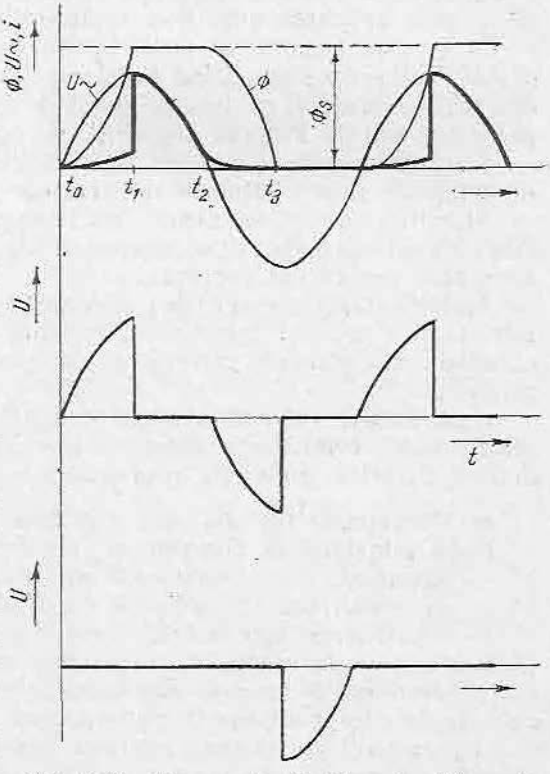


Fig. 9.43. Diagramele Φ, $U_{\sim}$, $i = f(t)$ pentru transductor.

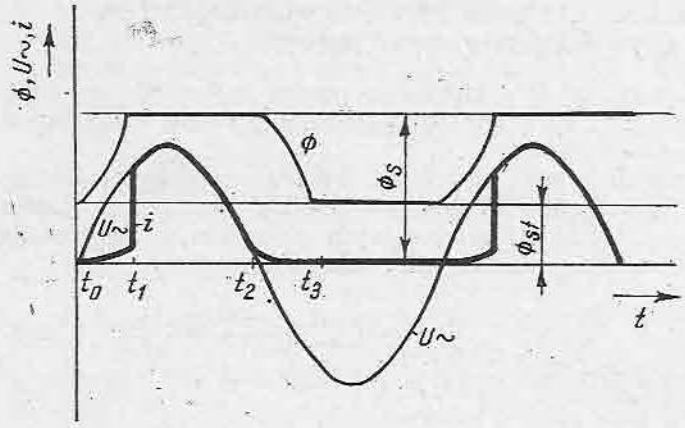


Fig. 9.44. Diagramele Φ, $U_{\sim}$, $i = f(t)$ pentru un amplificator magnetic.

În t_1 se produce saturarea și curentul crește brusc pînă la valoarea maximă, după care variază cu tensiunea pînă în punctul t_2. Din t_2 pînă în t_3 fluxul descrește, tensiunea se aplică la bornele reactanței și curentul rămîne zero pînă la o nouă saturare.

La **amplificatorul magnetic,** înfășurări suplimentare de comandă permit deplasarea punctului la care apare saturarea, mai aproape sau mai departe de t_0, prin aplicarea unui flux suplimentar Φ_{st} (fig. 9.44).

În țară se construiesc două tipuri de amplificatoare magnetice AMSU și AMSI, literele simbolizînd următoarele: *A*mplificator, *M*agnetic, cu miez din tablă Silicioasă, cu tola în formă de *U* (sau *I*) de mărimea *1* ... *8* și cu gabarit *a* sau *b*. Puterea absorbită de rețea ajunge pînă la 90 kVA.

Amplificatoarele dispun de înfășurări de lucru, una sau două înfășurări de comandă și o înfășurare de polarizare.

Amplificatoarele magnetice funcționează în montaj monofazat sau trifazat cu autosaturație, cu redresoare cu siliciu sau cu seleniu, cu ieșire în curent alternativ sau curent continuu.

Amplificatoarele magnetice prezintă următoarele avantaje: sînt statice, robuste, nu necesită întreținere, prezintă siguranță ridicată în exploatare, circuitele sînt separate galvanic și sînt gata de funcționare, fără o pregătire prealabilă.

Dezavantajele amplificatoarelor magnetice constau în: gabarit și greutate relativ mari, comportare dinamică inerțială, generează fenomene fizice neliniare, datorită cuplajelor magnetice și prezența armonicelor deformante.

● **Mutatoarele** sînt *dispozitive de transformare statică a energiei electrice.*

După principiul de funcționare, mutatoarele se clasifică astfel:

— *redresorul,* care transformă curentul alternativ în curent continuu;

— *invertorul,* care transformă curentul continuu în curent alternativ;

— *convertizorul,* care modifică curentul, tensiunea, frecvența și numărul de faze a energiei electrice. Se folosesc convertizoare de c.c. și c.a.;

— *variatorul de tensiune alternativă,* care reglează circulația de energie în circuite de curent alternativ pe principiul întîrzierii la amorsare;

— *variatorul de tensiune continuă,* care reglează circulația de energie în circuite de curent continuu pe principiul comenzii prin variația duratei pulsului.

Mutatoarele se fabrică într-o mare diversitate de tipuri. **Elementele de circuit ale mutatoarelor** cel mai des întîlnite în acționările electrice sînt următoarele: tiratronul, mutatorul polianodic cu vapori de mercur, excitronul, ignitronul, tranzistorul și tiristorul.

Tiratronul este un dispozitiv realizat în tub de sticlă sau de oțel cu vapori de mercur, catod cald și grilă de comandă. Se folosește pentru realizarea convertizoarelor de c.c. la 15 kV și 20 A.

Mutatorul polianodic cu vapori de mercur este realizat în cuve din oțel sudat, cu pompă de vid, răcire cu apă, cu excitație continuă și grile de comandă. Se folosește ca redresor sau invertor pentru alimentarea motoarelor mari de acționare în metalurgie, la curenți de 3 000 ... 8 000 A și tensiuni de 500 ... 3 000 V.

Excitronul este un element monoanodic realizat în cuvă sudată, etanșă, răcită cu aer sau apă, cu excitație continuă, aprindere succesivă și grile de comandă.

În secțiunea din figura 9.45 se observă următoarele elemente: *1* — anodul, *2* — grila de comandă, *3* — grila de comandă, *4* — ecranul de protecție, *5* — obturatorul, *6* — electrodul de aprindere, *7* — fixatorul pentru pata catodului și *8* — baza catodului.

Se folosește ca redresor sau convertizor la 30 ... 1 000 A și 500 ... 3 000 V.

Ignitronul este un element monoanodic realizat în cuvă sudată, etanșă, răcită cu aer sau apă, cu electrod de aprindere, grilă de comandă, fără excitație continuă.

În secțiunea din figura 9.46 se observă *1* — anodul, *2* — catodul, *3* — igniterul, *4* — grila și *5* — ecranul de protecție.

Se folosește ca redresor sau invertor pînă la 1 000 A și 600 V.

Diodele redresoare semiconductoare necomandate se folosesc într-o gamă foarte largă:

— *cu seleniu* sub formă de *plăci*, pentru tensiuni joase și curenți pînă la 10 kA;

— *diode cu germaniu* sau *siliciu*, pentru curenți de ordinul sutelor de amperi și tensiune inversă pînă la 2 kV.

Tranzistorul este un dispozitiv semiconductor, monocristal, din germaniu sau siliciu, cu trei straturi impurificate diferit, cu comandă continuă.

În regim de comutare poate fi folosit ca element de circuit de mutator, pentru comanda motoarelor de puteri mici.

Tiristorul este un ventil electric cu siliciu, comandat, cu patru straturi impurificate diferit.

Structura fizică și reprezentarea tiristorului sînt ilustrate în figura 9.47. Între anodul A și catodul K sînt patru straturi p-n-p-n și joncțiunile I_1, I_2, I_3. Sensul de conducție direct al curentului în regim de conducție i_p, este de la anod la catod, cînd se aplică tensiunea U_a.

Curentul de comandă i_G, produs de tensiunea U_G, se aplică la joncțiunea I_3; al doilea strat p este denumit grilă de comandă.

Starea de conducție a tiristorului este determinată de amplitudinea și durata impulsului de comandă.

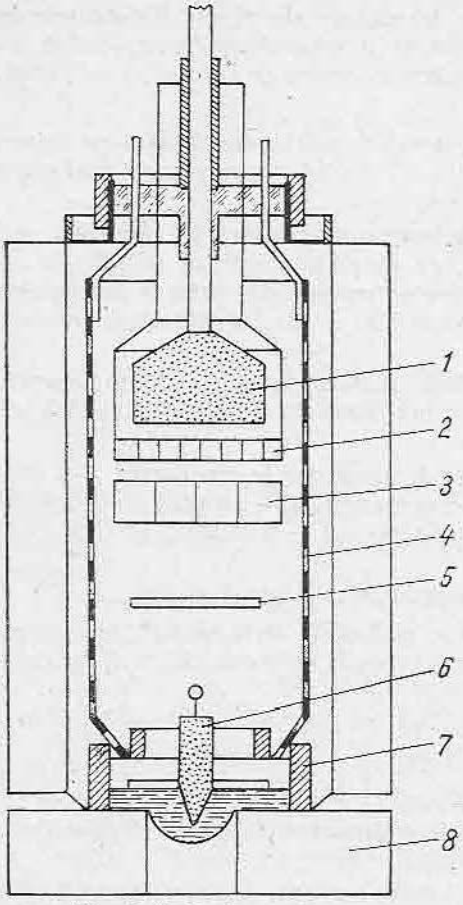


Fig. 9.45. Excitron (secțiune).

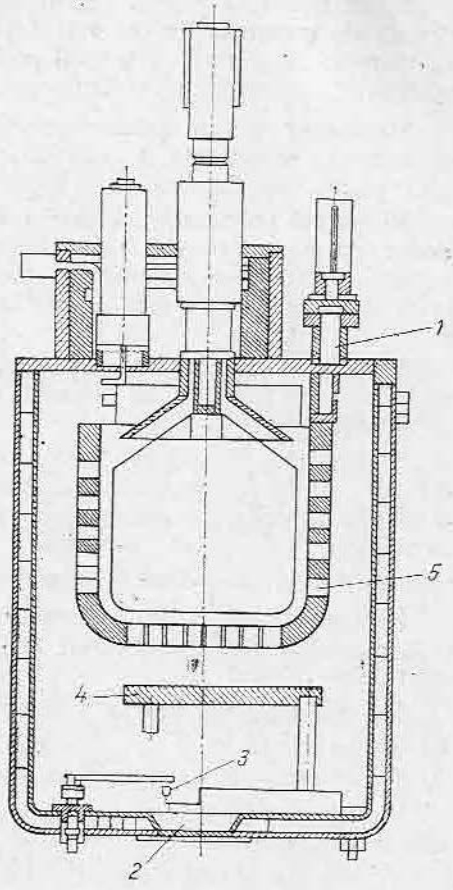


Fig. 9.46. Ignitron (secțiune).

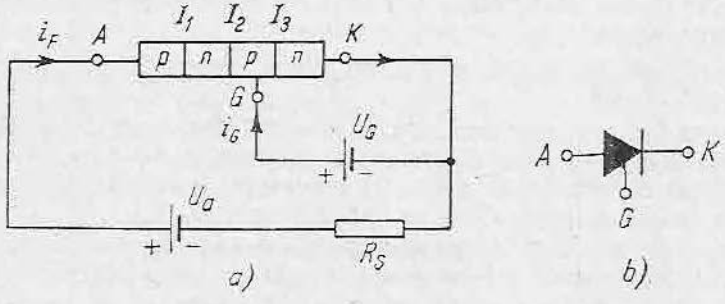


Fig. 9.47. Tiristor. Structură fizică, schemă de conectare și simbol de reprezentare.

În secțiunea tiristorului din figura 9.48 se observă următoarele elemente: *1* — placa din cupru, *2* — inelul de sudură, *3* — carcasa ceramică, *4* — tiristorul propriu-zis, *5* — racordul electrodului de comandă, *6* — racordul catodului.

Tiristoarele sînt cele mai răspîndite elemente folosite ca mutatoare în acționările moderne.

Tiristoarele au un gabarit redus, o comportare dinamică foarte bună și permit obținerea unor scheme de reglaj variate.

Se construiesc tiristoare pentru sute de amperi și pentru tensiuni inverse de 1 500 V pe element.

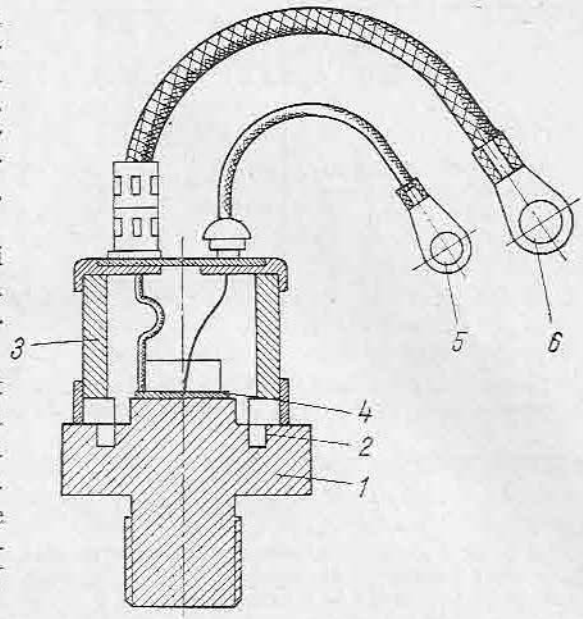


Fig. 9.48. Tiristor (secțiune).

O dezvoltare deosebită o cunosc în prezent ansamblurile cu tiristoare pentru reglarea vitezei seriilor de motoare *cu puterea cuprinsă între* 20 și 140 kW.

REZUMAT

- Aparate de conectare neautomate
  - separatoare
  - întrerupătoare cu pîrghie
  - întrerupătoare pachet
  - siguranțe fuzibile
  - prize și fișe
- Relee de protecție
  - de tensiune
  - de curent
    - termobimetalice
    - maximale
- Aparate de conectare automate
  - contactoare
    - forță
    - comandă
  - relee de timp
  - întrerupătoare automate

- Aparate de pornire, reglare, frînare, cuplare și automatizare
  - — pornire
    - comutatoare stea-triunghi
  - — reglare
    - controlere
    - reostate
    - rezistențe
    - ridicătoare electro-hidraulice
  - — frînare
    - electromagneți
  - — automatizare
    - butoane
    - chei
    - lămpi
    - limitatoare de cursă
- Aparate cu destinație specială
  - — întrerupătoare de avarie cu funie
  - — supraveghetoare de turație

VERIFICAREA CUNOȘTINȚELOR

1. Să se dimensioneze siguranțele pentru un motor asincron în scurtcircuit de 55 kW, $I_n = 110$ A, curentul de pornire $I_p = 6I_n$, folosind caracteristica timpului de topire din figura 9.5 și cunoscînd că pornirea se face în 8 s.
2. Ce protecții asigură întreruptorul automat tip ISOL?
3. Domeniul de reglare al releelor termice TSA este cuprins între (0,67 ... 1) I_t. Alegerea releului se face astfel încît curentul reglat să fie:
   a) la limita inferioară a domeniului de reglare?
   b) la limita superioară a domeniului de reglare?
   c) la mijlocul domeniului de reglare?
4. Pentru acționarea unei căi cu role de laminor reversibil acționate c. a. să se precizeze ce fel de contactoare trebuie alese:
   a) AC3?
   b) DC5?
   c) AC5?
5. Bobina unui releu de timp este dezexcitată; contactul normal închis al releului se închide după 4 s. Să se precizeze ce fel de releu de timp este:
   a) cu temporizare la închidere?
   b) cu temporizare la deschidere?
6. Prin ce se deosebește un controler de un aparat de comandă a cursei?
7. De cine depinde tensiunea maximă la bornele sarcinii conectate la un transductor?
8. Să se indice prin ce este superior transductorul față de tiristor?
9. Să se indice prin ce este superior tiristorul față de transductor?
10. Care este deosebirea esențială între excitron și ignitron?
11. Prin ce se deosebește tiristorul de tranzistor?

Capitolul 10

CINEMATICA ŞI DINAMICA ACŢIONĂRILOR ELECTROMAGNETICE

A. SCHEMA DE ACŢIONARE. CUPLURI

Schema structurală a unei acţionări electrice(fig. 10.1) cuprinde o sarcină S de exemplu o pompă, un ventilator, un strung etc., capabilă să producă un lucru mecanic util şi care primeşte energia mecanică (de mişcare) de la un motor electric M, alimentat cu energie electrică. Sistemul mecanic comportă şi o masă totală de inerţie I (figurată separat), care cuprinde atît piesele în mişcare ale ansamblului motor-sarcină, cît şi o masă de inerţie suplimentară (volant), asigurînd sporirea capacităţii de acumulare şi de cedare a energiei cinetice.

În scopul îndeplinirii unui anumit program de acţionare, motorul primeşte o comandă; după cum se cunoaşte, comanda poate fi efectuată manual (de către un operator uman) sau automat, prin intermediul unui aparataj electric adecvat (chei de comandă, reostate relee etc.).

La stabilirea regimului de mişcare a sistemului de acţionare intervin, în general, trei cupluri, corespunzător elementelor M, S şi respectiv I, din figura 10.1:

— *cuplul motor (activ)*;
— *cuplul static (de sarcină)*;
— *cuplul dinamic (de inerţie)*.

1. CUPLUL MOTOR

Cuplul motor (M_m) sau „de mişcare" este un *moment activ,* deoarece produce mişcarea ansamblului; el este caracteristic fiecărui tip de motor (asincron, sincron etc.), iar pentru acelaşi motor este dependent de variaţia diverşilor parametri.

Cuplul motor produce deci mişcarea şi se consideră pozitiv ($+M_m$). Cuplul motor devine negativ ($-M_m$) numai dacă motorul electric trece pe o caracteristică de frînare „recuperativă" (regim de generator). În această situaţie energia cinetică înmagazinată în masele de inerţie întreţine mişcarea pînă la oprire.

2. CUPLUL STATIC

Cuplul static (M_s) este un *moment rezistent,* adică opus momentului motor, fiind specific fiecărui tip de sarcină (pompă, ventilator, strung etc.) şi *cuprinde atît momentul necesar lucrului mecanic util, cît şi momentul de frecare mecanică* (frecare în lagăre, frecare cu aerul etc.).

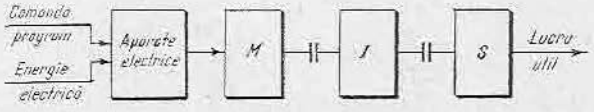


Fig. 10.1. Schema structurală a unei acţionări electrice.

Cuplul util poate fi variabil, în funcție de diferiți parametri.

Cuplul static în funcție de viteză.

Cuplul static poate fi independent de viteză, adică să aibă aceeași valoare, indiferent de viteză.

Exemple: mecanism pentru ridicarea greutăților, mașinilor-unelte pentru așchiere.

Cuplul static poate să varieze cu pătratul vitezei de rotație. Relația dintre cuplul static și viteze este:

$$M_s = M_{si} \left(\frac{\Omega}{\Omega_i}\right)^2.$$

în care M_{si} este cuplul la viteza Ω_i.

Exemple: ventilatoare, pompe centrifuge.

Cuplul static variază direct proporțional cu viteza.

Exemplu: generator de c.c. alimentînd o rezistență.

Cuplul static variază invers proporțional cu viteza de rotație.

Exemplu: mașina de bobinat sîrmă sau conductoare. Pentru realizarea unui diametru de sîrmă sau conductor constant, viteza de avans a materialului v și forța de tracțiune în material F trebuie să rămînă constante, indiferent de diametrul variabil d al tamburilor de înfășurare și desfășurare (fig. 10.2). Viteza unghiulară Ω trebuie să scadă pe măsură ce diametrul tamburului de înfășurare crește, deoarece:

$$v = \frac{d}{2}\Omega,$$

iar cuplul static este: $M_s = F\frac{d}{2}$.

Produsul dintre cuplul static și viteză (la oricare viteză Ω_i), trebuie să rămînă constant:

$$M_s\Omega = M_{si}\Omega_i = Fv = const.$$

Rezultă deci relația dintre cupluri și viteză:

$$M_s = M_{si}\frac{\Omega_i}{\Omega}.$$

Se observă că cuplul scade hiperbolic cu viteza, iar puterea rămîne constantă.

Cuplul static în funcție de unghiul de deplasare al unui organ de mașină.

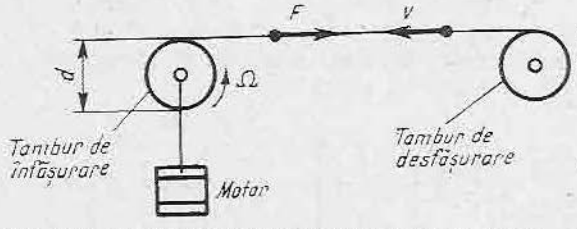


Fig. 10.2. Schema cinematică a unei mașini de bobinat.

Exemple: masele basculante ale laminoarelor, transmisiile cu bielă manivelă, compresoare etc. (fig. 10.3).

Cuplul static în funcție de cursă.

Exemple: mașini de transportat pe pante cu înclinare variabilă.

Cuplul static în funcție de timp. Toate cuplurile statice sînt direct sau indirect funcție de timp. Pentru practica proiectării, cuplurile statice dependente de alți parametri (descrise mai sus) se transformă în funcții de timp.

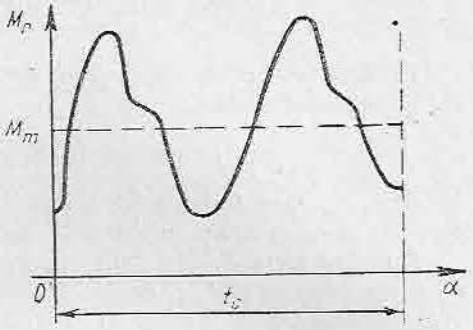


Fig. 10.3. Variația cuplului static la axul unui compresor.

Cuplul static este rezistent, adică se opune mișcării și deci, în mod normal, se consideră negativ ($-M_s$). În anumite situații, cuplul static poate contribui la accelerarea mișcării, de exemplu la coborîrea sarcinilor, caz în care se consideră pozitiv ($+M_s$).

Notă. În cele ce urmează, prin „accelerare" se va înțelege numai sporirea vitezei (accelerație pozitivă), iar prin „frînare" (decelerare) numai reducerea vitezei (accelerație negativă).

3. CUPLUL DINAMIC

Cuplul dinamic (M_d) este un moment de asemenea rezistent, prin care masele în mișcare se opun variațiilor de viteză. Rezultă de aici că în funcționare la viteză constantă cuplul dinamic este nul.

Cuplul dinamic fiind rezistent se opune mișcării și se consideră negativ ($-M_d$) în regim de accelerare (la pornirea din repaus pînă la o anumită viteză sau în general la creșterea vitezei) și pozitiv ($+M_d$) în regim de frînare (la oprire sau în general la scăderea vitezei).

B. ECUAȚIA FUNDAMENTALĂ A MIȘCĂRII

1. FORME DE BAZĂ ALE ECUAȚIEI FUNDAMENTALE

Suma algebrică a valorilor instantanee pentru cuplurile care acționează asupra unui sistem în mișcare, de exemplu un ax de antrenare, este nulă:

$$M_m - M_s - M_d = 0.$$

Această relație, care stabilește echilibrul cuplului motor M_m, cuplului static M_s și cuplului dinamic M_d, se numește *ecuația fundamentală a mișcării*; starea de echilibru se menține pe toată perioada mișcării.

Toate cuplurile sînt considerate ca raportate la axul motorului de acționare. Valabilitatea ecuației fundamentale se extinde la toate axele acționării, însă prin convenție se alege axul motorului ca ax de raportare.

Atenție! Cuplurile se consideră cu semnul plus cînd contribuie la producerea și întreținerea mișcării și cu semnul minus cînd se opun mișcării.

Ecuația mișcării poate fi scrisă și sub forma:

$$M_m = M_s + M_d.$$

Cuplul motor echilibrează cuplurile care se opun mișcării.

2. FORME DERIVATE DIN ECUAȚIA FUNDAMENTALĂ

Ecuația fundamentală poate fi dezvoltată într-o formă analoagă cu ecuația legii mișcării rectilinii:

$$F_m = F_s - ma,$$

în care F_m este forța echivalentă care produce mișcarea, F_s — rezultanta forțelor care se opun mișcării și ma — produsul dintre masă și accelerație.

Aplicînd forța F_m (fig. 10.4) tangent unui corp cilindric C fixat în lagărele l_1, l_2 va lua naștere un cuplu M_m care produce învîrtirea cilindrului cu viteza liniară v sau cu viteza unghiulară Ω.

Pentru a determina echilibrul cuplurilor care se produc în mișcare, se multiplică forțele din ecuația mișcării rectilinii cu brațul de forță, care este R (raza corpului cilindric):

$$F_m R = F_s R + maR.$$

Termenul $F_m R$ este cuplul motor, $F_s R$ este cuplul static, iar maR este cuplul dinamic.

Accelerația fiind derivata vitezei v în raport cu timpul, iar $v = \Omega R$, rezultă:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d(\Omega R)}{dt} = R\frac{d\Omega}{dt}.$$

Înlocuind accelerația în ecuația mișcării, se obține:

$$F_m R = F_s R + mR^2 \frac{d\Omega}{dt} = M_m = M_s + M_d.$$

Așadar, *cuplul dinamic M_d al unui corp de masă m care se rotește cu viteza Ω este proporțională cu pătratul razei de rotație R.*

3. MOMENTE DE INERȚIE, ENERGIE CINETICĂ, MOMENT DE VOLANT

Momentul de inerție axial J, al unui corp C (fig. 10.4) **în mișcare de rotație,** este *suma produselor dintre masa punctelor m_i și pătratul distanțelor R_i față de axa de rotație*

$$J = \sum_1^n m_i R_i^2, \text{ în care } i = 1 \ldots n.$$

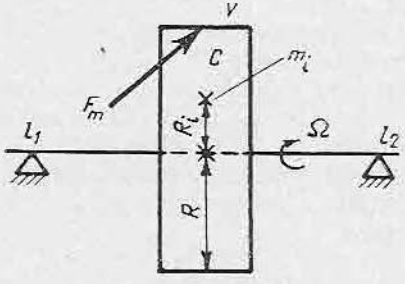


Fig. 10.4. Acțiunea unei forțe aplicate asupra unui corp care se poate roti.

Energia cinetică A_i a unui punct cu masa m_i în mișcare de rotație este:

$$A_i = m_i \frac{v_i^2}{2} = m_i \frac{\Omega^2 R_i^2}{2},$$

în care v_i și Ω sînt vitezele liniară și respectiv unghiulară ale punctului i.

Pentru corpul solid format din n puncte, **energia cinetică totală** este:

$$A = \sum_1^n A_i = \sum_1^n m_i \frac{\Omega^2 R_i^2}{2} = \frac{\Omega^2}{2} \sum_1^n m_i R_i^2.$$

Deoarece suma $m_i R_i^2$ reprezintă momentul de inerție J al corpului, rezultă că energia cinetică a unui corp în rotație poate fi exprimată sub forma:

$$A = J \frac{\Omega^2}{2}.$$

Concluzie. Energia cinetică a unui corp solid în mișcare este proporțională cu momentul de inerție și cu pătratul vitezei unghiulare de rotație.

Momentul de inerție exprimă capacitatea de acumulare a energiei cinetice a organelor și pieselor în mișcare pentru utilajele acționate.

Acționările electrice folosesc în anumite situații *mase de inerție care acumulează energie cinetică în perioadele în care cuplul rezistent este redus și cedează energia acumulată la vîrfuri sau șocuri de sarcină.* Aceste mase de inerție cu destinație specială se numesc **volanți.**

Exemple de utilaje care folosesc volanți sînt: prese mecanice, ghilotine, compresoare etc.

Volanții uniformizează mersul mecanismelor, permit dimensionarea economică a motoarelor și limitează șocurile de curent în rețelele electrice.

Momentul de inerție al volantului se numește **moment de volant** și se exprimă folosind greutatea G a masei de inerție.

Masa volantului* este raportul dintre greutatea G și accelerația gravității $g(\mathrm{m/s^2})$:

$$\sum_1^n m_i = m = \frac{G}{g} = \frac{G}{9{,}81}.$$

Raza medie a punctelor de masă m_i este R și se numește **raza de girație a volantului:**

$$\sum_1^n R_i = R.$$

Notînd $2R = D$ (diametrul de girație), momentul de inerție obținut astfel este:

$$J = mR^2 = \frac{G}{g}\left(\frac{D}{2}\right)^2 = \frac{GD^2}{4g} \qquad [\mathrm{Nms^2}].$$

Mărimea lui GD^2 se numește moment de volant și este dată de expresia:

$$GD^2 = 4gJ \ [\mathrm{Nm^2}].$$

Momentul de volant (GD^2) al mașinilor electrice precum și al diverselor utilaje avînd piese în rotație este dat în cataloage fiind exprimat în $\mathrm{Nm^2}$.

Momentul de inerție (J) se exprimă în $\mathrm{Nms^2}$.

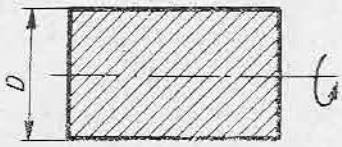
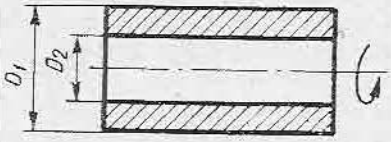
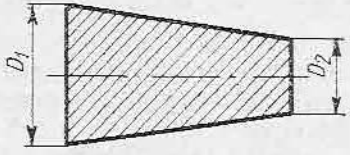
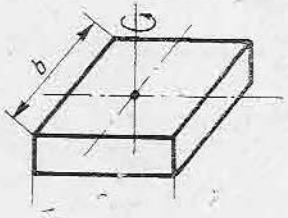
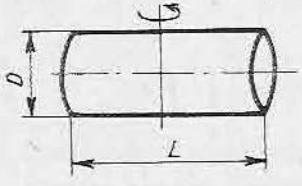
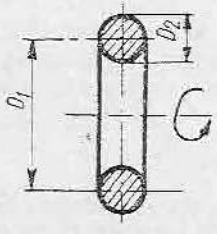
În tabelul 10.1 sînt indicate diametrele de girație ale unor corpuri geometrice simple.

---

* Cele arătate mai jos sînt valabile atît pentru masele de inerție prevăzute special (volanți), cît și pentru masele de inerție aferente întregului sistem în mișcare (rotor, axe etc.).

Tabelul 10.1.

Diametre de inerție pentru corpuri geometrice simple

Denumirea corpului	Schița corpului	Pătratul diametrului de giratie D_i^2
Cilindru plin		$\frac{D^2}{2}$
Tub		$\frac{D_1^2 + D_2^2}{2}$
Trunchi de con plin		$\frac{3}{10}\frac{D_1^5 - D_2^5}{D_1^3 - D_2^3}$
Corp prismatic		$\frac{b^2 + c^2}{12}$
Cilindru plin		$\frac{L^2}{12} + \frac{D^2}{16}$
Tor		$\frac{4D_1^2 + 3D_2^2}{4}$

Pentru forme geometrice complexe se procedează la reducerea la forme simple și la calculul unui diametru echivalent D_e

$$GD_e^2 = \sum_1^n GD_i^2.$$

În proiectarea acționărilor este necesar ca momentul de volant să fie apreciat înainte de alegerea motorului; calculul se face cu relația

$$GD^2 = \sigma \pi l \frac{D^2}{2},$$

în care σ este un coeficient proporțional cu puterea motorului, iar d și D reprezintă lungimea, respectiv diametrul rotorului.

Următoarele formule empirice se folosesc la calculul momentului de volant, cînd acestea nu sînt cunoscute din cataloage:

— pentru motoare asincrone: $GD^2 = 343\,288 \frac{P^{1,4}}{n}$ [Nm²];

— pentru motoare sincrone: $GD^2 = 804\,274 \frac{P^{1,26}}{n^2}$ [Nm²].

Formulele sînt valabile pentru motoare cu puteri P cuprinse între 10 și 1 000 kW.

C. REDUCEREA CUPLURILOR LA AXUL MOTORULUI

Obiectivul final al calculelor acționărilor electrice îl constituie determinarea cuplului și puterii motorului. Folosind ecuația fundamentală:

$$M = \pm M_r \pm M_d,$$

se calculează cuplul motor echivalent necesar.

Între motorul de acționare și elementul acționat (sarcină) există un lanț cinematic de organe de mașini, axe, angrenaje, reductoare; fiecare dintre aceste elemente intermediare au momente de inerție proprii, care produc cupluri dinamice la accelerare și decelerare. De asemenea, fiecare element intermediar introduce frecări, care reprezintă cupluri rezistente.

Toate cuplurile care intervin în fiecare moment în ecuația fundamentală a mișcării trebuie considerate față de un ax unic; această raportare se face la axul motorului și se numește reducerea cuplurilor la axul motor.

Cuplul rezultat este cuplul echivalent la axul motor și pe baza lui se determină puterea necesară a motorului.

1. REDUCEREA CUPLURILOR STATICE LA AXUL MOTOR

În foarte puține acționări transmiterea puterii se face direct de la motor la elementul acționat (exemple: polizor, ferăstrău, scule portative etc.).

De obicei, puterea motorului se transmite prin cuplaje diverse (cu roți dințate, curele, cuplaje magnetice, hidraulice, electrice).

Într-un angrenaj simplu (fig. 10.5) există un ax motor care se rotește cu viteza Ω_p și un al doilea ax antrenat care se rotește cu viteza Ω_q.

Toate transmisiile au un randament propriu η_{pq} (de valoare subunitară), care reprezintă raportul dintre puterea de ieșire P_q (primită de axul q) și puterea de intrare P_p (transmisă de axul p).

$$\eta_{pq} = \frac{P_q}{P_p}.$$

Rezultă:

$$P_q = P_p \cdot \eta_{pq}.$$

Datorită vitezelor Ω_p și Ω_q diferite, cuplurile vor fi deosebite:

$$M_q \cdot \Omega_q = M_p \cdot \Omega_p \cdot \eta_{pq};$$

$$M_q = M_p \cdot \frac{\Omega_p}{\Omega_q} \eta_{pq}.$$

Raportul de transmitere între axele p și q se notează $i_{pq} = \frac{\Omega_p}{\Omega_q}$ și relația de mai sus devine:

$$M_q = M_p \cdot i_{pq} \cdot \eta_{pq}$$

sau

$$M_p = M_q \cdot \frac{1}{i_{pq}} \cdot \frac{1}{\eta_{pq}}.$$

În cazul general al unei acționări cu angrenaj multiplu (cu n axe), *puterile transmise* exprimate ca produse între cuplu și viteză sînt (fig. 10.6):

$$P_1 = M_1\Omega_1$$
$$P_2 = M_2\Omega_2$$
$$P_3 = M_3\Omega_3$$
$$\ldots\ldots\ldots\ldots$$
$$P_{n-1} = M_{n-1}\Omega_{n-1}$$
$$P_n = M_n\Omega_n$$

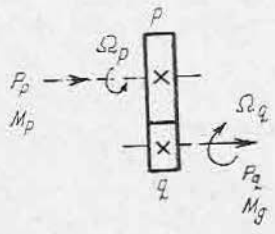


Fig. 10.5. Cuplarea prin angrenaj simplu.

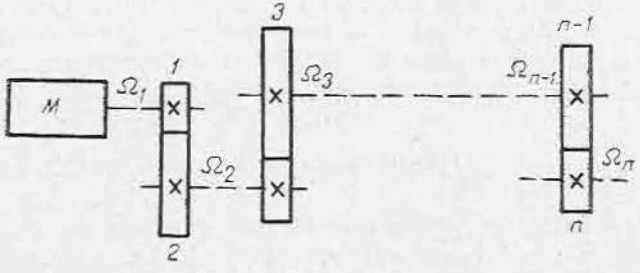


Fig. 10.6. Acționare cu angrenaj multiplu.

2. REDUCEREA CUPLURILOR DINAMICE LA AXUL MOTOR

Asemenea cuplurilor statice, și cuplurile dinamice trebuie reduse la axul motorului. În acționarea multiplă cu n axe, fiecare element din lanțul cinematic are un moment de inerție propriu J_i și acumulează o energie cinetică A_i definită de relația:

$$A_i = J_i \frac{\Omega^2}{2}.$$

Energia cinetică totală A acumulată este formată din suma energiilor cinetice A_i ale elementelor lanțului cinematic:

$$A = A_1 + A_2 + \dots A_n = \sum_1^n A_i.$$

Energia cinetică redusă la axul 1 al motorului este exprimată prin relația

$$A = J_1 \frac{\Omega_1^2}{2} + J_2 \frac{\Omega_2^2}{2} + J_3 \frac{\Omega_3^2}{2} + \dots + J_n \frac{\Omega_n^2}{2} = J_r \frac{\Omega_i^2}{2},$$

în care prin J_r s-a notat valoarea momentului de inerție redus la axul motorului.

Din această relație se deduce:

$$J_r = J_1 + J_2 \left(\frac{\Omega_2}{\Omega_1}\right)^2 + J_3 \left(\frac{\Omega_3}{\Omega_1}\right)^2 + \dots J_n \left(\frac{\Omega_n}{\Omega_1}\right)^2.$$

Înlocuind rapoartele vitezelor unghiulare prin rapoartele de transmisie i, se obține:

$$J_r = J_1 + J_2 \frac{1}{i_{12}^2} + J_3 \frac{1}{i_{13}^2} + \dots + J_n \frac{1}{i_{1n}^2}.$$

Momentul de volant GD^2 corespunzător este:

$$GD^2 = 4gJ_r.$$

Momentul de volant total însumează deci momentul de volant redus al elementelor lanțului cinematic cu momentul de volant al motorului.

3. TRANSFORMAREA MIȘCĂRII DE TRANSLAȚIE ÎN MIȘCAREA DE ROTAȚIE

În lanțurile cinematice intervin adesea elemente care se mișcă pe traiectorii liniare. În acest caz, pentru reducerea cuplurilor la axul motor se procedează la găsirea unor mărimi echivalente calculate pe principiul conservării energiei. Energia elementelor cu mișcare liniară E_t este echivalentă cu energia unor elemente fictive în mișcare de rotație E_r:

$$E_t = \frac{mv^2}{2} = E_r = J_r \frac{\Omega^2}{2}.$$

Puterile pot fi *reduse la axul motor 1* introducînd randamentele transmisiilor:

$$P_2 = P_1 \cdot \eta_{12}$$

$$P_3 = P_2\eta_{23} = P_1 \cdot \eta_{12} \cdot \eta_{23}$$

$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots$$

$$P_{n-1} = P_1 \cdot \eta_{12} \cdot \eta_{23} \cdots \eta_{(n-2)(n-1)}$$

$$P_n = P_1 \cdot \eta_{12} \cdot \eta_{23} \cdots \eta_{(n-1)\cdot n} = P_1\eta.$$

Randamentul total η *al acționării* este așadar produsul randamentelor tuturor transmisiilor:

$$\eta = \eta_{12} \cdot \eta_{23} \cdots \eta_{(n-1)n}.$$

Puterea redusă la axul motor *1* este:

$$P_1 = \frac{P_n}{\eta},$$

în care P_n este puterea corespunzătoare cuplului rezistent util. Cuplurile transmise exprimate în funcție de puteri și viteze unghiulare sînt:

$$M_1 = \frac{P_1}{\Omega_1}; \quad M_2 = \frac{P_2}{\Omega_2}; \quad M_3 = \frac{P_3}{\Omega_3}; \ldots M_n = \frac{P_n}{\Omega_n}.$$

Între cupluri și vitezele unghiulare se pot scrie relațiile:

$$M_1 = M_2 \frac{1}{i_{12}} \cdot \frac{1}{\eta_{12}} = M_3 \frac{1}{i_{12}} \cdot \frac{1}{i_{23}} \cdot \frac{1}{\eta_{12}} \cdot \frac{1}{\eta_{23}} =$$

$$= \ldots = M_n \left(\frac{1}{i_{12}} \cdot \frac{1}{i_{23}} \cdots \frac{1}{i_{(n-1)\cdot n}}\right)\left(\frac{1}{\eta_{12}} \cdot \frac{1}{\eta_{23}} \cdots \frac{1}{\eta_{(n-1)\cdot n}}\right).$$

Raportul de transmisie total al acționării este produsul $i_{12} \cdot i_{23} \ldots i_{n-1} \cdot i_n = i = \frac{\Omega_1}{\Omega_n}$, obținut prin eliminarea vitezelor unghiulare ale axelor intermediare:

$$i = \frac{\Omega_1}{\Omega_2} \cdot \frac{\Omega_2}{\Omega_3} \cdots \frac{\Omega_{n-1}}{\Omega_n} = \frac{\Omega_1}{\Omega_n}.$$

Cuplul redus la axul motor 1 este deci:

$$M_1 = M_n \frac{1}{i} \cdot \frac{1}{\eta},$$

în care M_n este cuplul rezistent util.

Rezultă momentul de inerție redus la axul motor, produs de masa m în mișcare liniară cu viteza v:

$$J_r = \frac{mv^2}{\Omega^2}.$$

Momentul de volant corespunzător introdus de masele de translație este:

$$(GD^2)_r = \frac{4gmv^2}{\Omega^2} = \frac{4Gv^2}{\Omega^2},$$

în care G este greutatea corpului în mișcare de translație.

REZUMAT

1. *Toate acționările electrice cuprind:* o sarcină, o masă totală de inerție și un motor electric.

2. *Regimul de mișcare al unui sistem de acționare* este determinat de echilibrul cuplurilor: motor, static și dinamic.

3. *Echilibrul cuplurilor* se exprimă matematic prin ecuația fundamentală a mișcării ($M_m = M_s + M_d$).

4. *Cuplul dinamic al corpurilor în mișcare de rotație* este proporțional cu pătratul razei de rotație.

5. *Volantul* este o masă de inerție folosită în acționările electrice care acumulează energie cinetică în perioada în care momentul de sarcină este redus și o cedează la șocuri de sarcină.

6. Fiecare mașină electrică se caracterizează printr-un *moment de volant* GD^2 — propriu.

7. Pentru calculul cuplului motor necesar al unei acționări electrice, toate cuplurile se reduc la axul motor.

VERIFICAREA CUNOȘTINȚELOR

1. Momentul dinamic este pozitiv:
a) în regim de accelerare?
b) în regim de frînare?
c) independent de regim?

2. Momentul de inerție axial este o mărime ce depinde de:
a) masa și dimensiunile pieselor în mișcare?
b) viteza unghiulară a pieselor în mișcare?
c) cuplul motor?

3. Raportul total de transmisie al unei acționări este:
a) produsul rapoartelor de transmisie intermediare?
b) suma rapoartelor de transmisie intermediare?
c) suma pătratelor rapoartelor de transmisie intermediare?

4. Momentul de volant GD^2 variază proporțional cu:
a) momentul de inerție axial?
b) pătratul momentului de inerție axial?
c) raportul de transmisie al momentelor?

5. Care este elementul de referință al cuplurilor în ecuația fundamentală a mișcării:
a) axul sarcinii?
b) viteza de rotație unghiulară?
c) axul motor?

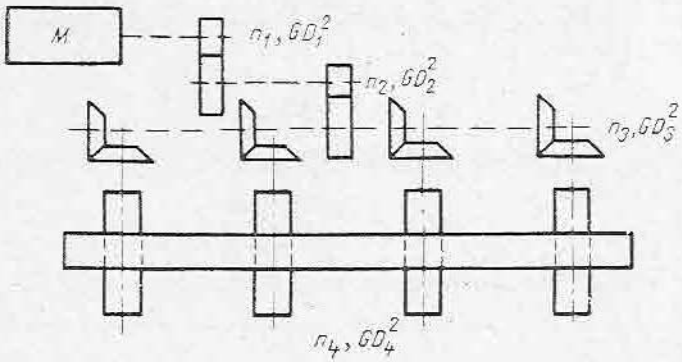


Fig. 10.7. Acționare pentru cale cu role.

6. Să se calculeze momentul de inerție și GD^2-ul unui volant avînd greutatea de 25 kg și raza de girație de 0,20 m.

7. Ce este raportul de transmisie între două axe care se rotesc cu vitezele ω_p și ω_q și cum se notează?

8. Ce este randamentul total al unui lanț cinematic, și prin ce relație se exprimă?

9. Să se calculeze momentul de inerție produs de un corp de 10 kg în mișcare de translație cu viteza de 0,1 m/s, dacă viteza axului de raportare a momentelor este de 1 $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$.

10. Să se calculeze momentul de volant al unei căi cu role (fig. 10.7) care transportă un lingou de 1 t. Rolele au diametrul de 0,20 m, iar turațiile și momentele de volant ale axelor sînt:

$n_1 = 500$ rot/min $\quad GD_1^2 = 20$ Nm^2

$n_2 = 100$ rot/min $\quad GD_2^2 = 2\,000$ Nm^2

$n_3 = 75$ rot/min $\quad GD_3^2 = 1\,500$ Nm^2

$n_4 = 150$ rot/min $\quad GD_4^2 = 3\,000$ Nm^2.

Capitolul 11

CARACTERISTICILE MECANICE ALE MAȘINILOR DE LUCRU

1. CLASIFICARE

Alegerea motoarelor cu care sînt echipate mașinile de lucru pornește de la diagrama de sarcină (caracteristica mecanică) a mașinii de lucru.

Caracteristica mecanică a sarcinii reprezintă dependența dintre cuplul static și una din următoarele mărimi: viteza, unghiul de rotație, spațiul sau timpul.

Caracteristicile mecanice permit împărțirea mașinilor de lucru în cinci grupe.

Grupa 1. Cuplul static este constant, puterea este proporțională cu viteza, iar caracteristica mecanică se prezintă ca o dreaptă paralelă cu ordonata (fig. 11.1):

$$M_s = ct; \quad P \sim n.$$

Exemple: o greutate suspendată de cîrligul unei macarale ridicată cu aceeași viteză de la sol pînă la înălțimea cerută, căruciorul de pe podurile rulante care se deplasează în deschiderea unei hale, transportorul cu bandă, calea cu role de la un laminor etc.

Grupa 2. Cuplul static depinde de viteză.

Grupa 2.1. Cuplul static este proporțional cu viteza, puterea este proporțională cu pătratul vitezei, iar caracteristica mecanică este o curbă care trece prin origină (fig. 11.2):

$$M_s \sim n; \quad P \sim n^2.$$

Exemple: cilindri cu frecare datorită viscozității, frînă cu curenți turbionari.

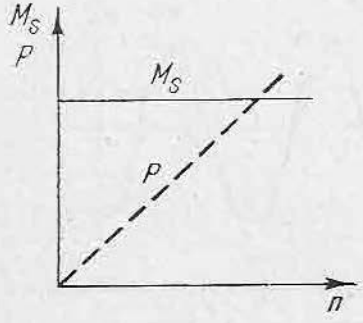


Fig. 11.1. Caracteristică mecanică pentru mașină de lucru din grupa 1.

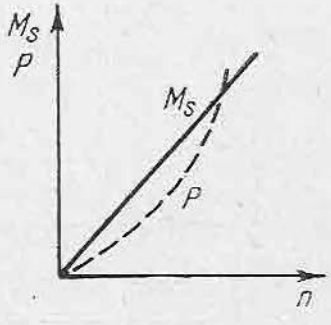


Fig. 11.2. Caracteristică mecanică pentru mașină de lucru din grupa 2.1.

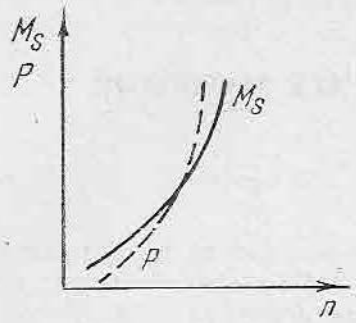


Fig. 11.3. Caracteristică mecanică pentru mașină de lucru din grupa 2.2.

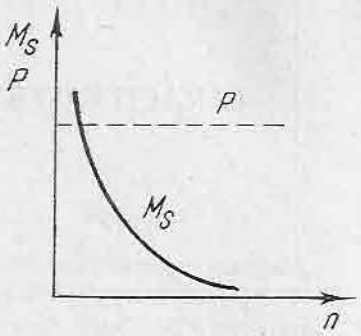


Fig. 11.4. Caracteristică mecanică pentru mașină de lucru din grupa 2.3.

Grupa 2.2. Cuplul static este proporțional cu pătratul vitezei, puterea este proporțională cu viteza la puterea treia, iar caracteristica mecanică este de asemenea o curbă care trece prin origine (fig. 11.3):

$$M_s \sim n^2; \quad P \sim n^3$$

Exemple: pompe, ventilatoare, centrifuge.

Grupa 2.3. Cuplul static este invers proporțional cu viteza, puterea este constantă, iar caracteristica mecanică este o hiperbolă (fig. 11.4):

$$M_s \sim \frac{1}{n}; \quad P = ct.$$

Exemple: mașini de bobinat și de derulat, strunguri frontale.

Caracteristica mecanică reprezintă în practică rezultanta unor caracteristici mecanice elementare. Astfel, pentru un ascensor, caracteristica mecanică rezultă din suprapunerea cuplului de frecare variabil și unui cuplu constant (fig. 11.5).

Grupa 3. Caracteristica mecanică (fig. 11.6) reprezintă cuplul pulsator, care poate fi descompus prin metode matematice într-o componentă constantă M_{sm} și în oscilații sinusoidale.

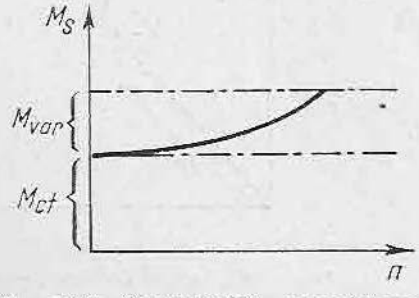


Fig. 11.5. Caracteristică mecanică-rezultantă.

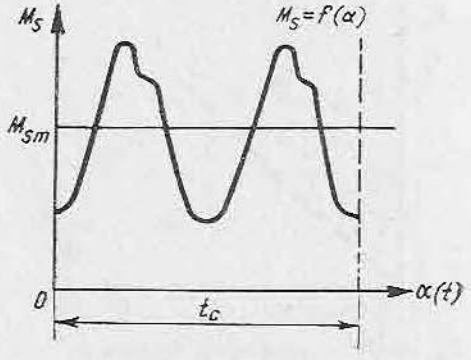


Fig. 11.6. Caracteristică mecanică pentru mașină de lucru din grupa 3.

Exemplu: un compresor acționat de o bielă manivelă. Cuplul rezistent variază în funcție de unghiul α pe care îl face biela față de direcția cursei pistonului din cilindrul de compresiune.

Grupa 4. Alura caracteristicii mecanice este determinată de înclinare.

Exemplu: un vagon autopropulsant pe o cale de rulare cu diferite pante.

Grupa 5. Caracteristica mecanică este redată prin variația cuplului static în funcție de timp.

Din caracteristici mecanice în funcție de diferiți parametri, se pot obține caracteristicile mecanice în funcție de timp, care sînt folosite în mod obișnuit în proiectare.

2. DETERMINAREA GRAFICULUI CARACTERISTICII MECANICE DE SARCINĂ

Graficul caracteristicii mecanice de sarcină al unei mașini de lucru poate fi trasat după determinarea graficelor forțelor și vitezelor aferente.

La funcționarea cu viteză constantă, forța rezistentă F_r care trebuie învinsă de mașină este rezultanta dintre forța utilă F_u consumată pentru realizarea produsului și forța de frecare F_f, care se consumă între diferitele organe în mișcare ale mașinii de lucru:

$$F_r = F_u + F_f.$$

Se observă că la funcționare în gol (mașina nu produce), forța rezistentă și forța de frecare se echilibrează.

La funcționarea în regim de pornire și de oprire, cînd viteza variază în timp, apare forța dinamică F_d, proporțională cu masa organelor în mișcare m și cu accelerația liniară imprimată acestora:

$$F_d = ma.$$

Forța dezvoltată de motor F trebuie să compenseze forța rezistentă și forța dinamică:

$$F = F_r + F_d = F_r + ma.$$

Din ecuația echilibrului forțelor, se poate explicita accelerația liniară:

$$a = \frac{F - F_r}{m}.$$

Accelerația fiind variația vitezei în funcție de timp $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$, prin înlocuire, se obține funcția dintre variația vitezei și forțe:

$$\Delta v = \frac{F - F_r}{m} \Delta t.$$

Această relație ne permite să trasăm graficele forței și vitezei.

La pornire, forța F dezvoltată de motor fiind F_1, constantă, variația vitezei

$$\Delta v = \frac{F_1 - F_r}{m} \Delta t$$

este proporțională cu variația timpului.

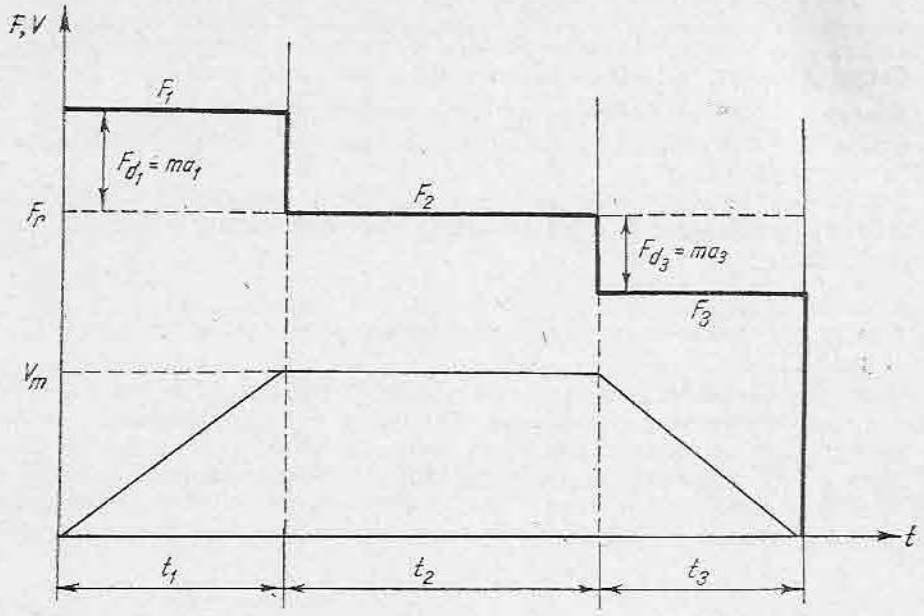


Fig. 11.7. Graficul forțelor și vitezelor unei mașini de lucru.

Pe graficul din figura 11.7 pentru intervalul de timp t_1, viteza este reprezentată printr-o dreaptă care pornește din originea axelor de coordonate pînă la viteza nominală a mașinii de lucru, iar forța F_1 printr-o dreaptă paralelă cu abscisa; forța F_1 echilibrează forța rezistentă F_r și forța dinamică consumată pentru învingerea inerției.

Pentru intervalul de timp t_2, mașina de lucru își continuă mișcarea la viteză constantă și la o forță constantă F_2 consumată pentru învingerea forței rezistente $\frac{\Delta v}{\Delta t} = 0 = \frac{F_2 - F_r}{m}$:

$$F_2 = F_r.$$

Viteza și forța se reprezintă pe grafic prin paralele la abscisă.

Presupunînd că și la oprire forța F_3 este constantă, variația vitezei devine din nou proporțională cu variația timpului:

$$\Delta v = \frac{F_3 - F_r}{m} \Delta t$$

iar pe grafic, în intervalul t_3, viteza se reprezintă printr-o dreaptă care pornește de la viteza nominală și scade pînă la 0.

Forța dinamică acționează în același sens cu forța motorului astfel că F_3 se reprezintă printr-o dreaptă paralelă cu abscisa dar sub valoarea lui F_2.

Cunoscînd relația dintre putere, forță și viteză

$$P = Fv$$

pe baza graficului comun al vitezelor și forțelor, se poate trece la determinarea graficului de sarcină al mașinii de lucru.

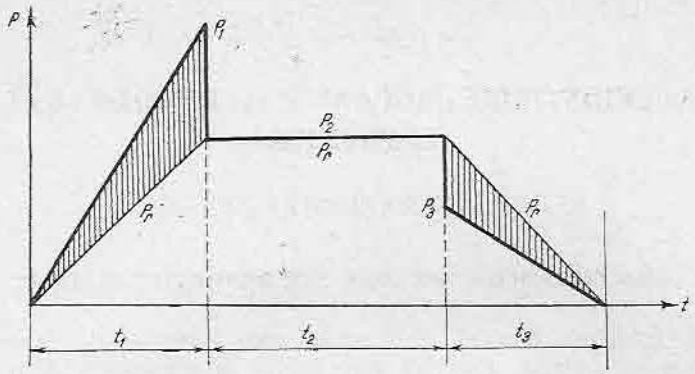


Fig. 11.8. Graficul de sarcină al unei mașini de lucru.

În acest scop, pentru diferite puncte de timp din abscisă, se determină valorile corespunzătoare ale forței și vitezei, efectuînd produsele și marcîndu-le pe graficul de sarcină (fig. 11.8).

Graficul de sarcină al mașinii de lucru arată că la o forță rezistentă constantă, puterea dezvoltată necesară urmărește un grafic similar cu cel al vitezei (trapezoidal).

La pornire motorul este solicitat să suplimenteze puterea necesară învingerii forței rezistente, iar la oprire motorului i se cere o putere mai mică decît aceea necesară învingerii forței rezistențe (vezi hașurile din grafic).

Graficul caracteristicii mecanice de sarcină prezentat este un exemplu simplificat, necesar înțelegerii fenomenelor luate în considerare.

În realitate, forma graficelor este mai complexă și depinde, printre alți factori, de regimul de funcționare al mașinii de lucru.

REZUMAT

1. Caracteristica mecanică a mașinilor de lucru exprimă dependența dintre cuplul static și una din următoarele mărimi: viteza, unghiul de rotație, spațiul și timpul. În funcție de caracteristica mecanică se cunosc cinci grupe de mașini de lucru.

2. Graficul caracteristicii de sarcină a mașinii de lucru (simplificat) se poate determina din graficele de forță și de viteză.

VERIFICAREA CUNOȘTINȚELOR

Un motor antrenează un generator care debitează într-o rețea avînd consumatori cu sarcină rezistivă.

Din ce grupă face parte caracteristica mecanică a motorului?

a — 2; *b* — 3; *c* — 1.

Capitolul 12

CARACTERISTICILE MECANICE ALE MOTOARELOR ELECTRICE

A. CONSIDERAȚII GENERALE

1. CARACTERISTICILE MECANICE ALE MOTORULUI ELECTRIC

Alegerea, folosirea optimă, realizarea unor condiții de funcționare și manevrare* a motoarelor electrice sînt legate de cunoașterea parametrilor și performanțelor acestora.

În acest scop este necesară cunoașterea caracteristicilor mecanice precum și a comportării motoarelor electrice atît în funcționarea de regim, cît și la pornire și frînare.

Caracteristica mecanică reprezintă dependența turației n (vitezei de rotație) în funcție de cuplul motorului M:

$$n = f(M)$$

și este construită pentru regimul staționar al motorului.

Caracteristica curentului I în funcție de turație:

$$I = f(n)$$

completează cunoașterea comportării motorului, oferind datele necesare determinării regimului termic și a valorilor maxime de curent.

Caracteristica mecanică este o curbă ale cărei puncte determină funcționarea motorului electric. În figura 12.1, punctul P de pe caracteristică (la intersecția momentului motor M cu cel de sarcină M_s), determină starea de echilibru stabil pentru funcționarea la turația n_1, căreia îi corespunde un cuplu motor M_1; o modificare a turației la n_2 conduce la o nouă stare de echilibru, în punctul Q, căruia îi corespunde cuplul M_2.

Caracteristica naturală este caracteristica mecanică corespunzătoare valorilor nominale electromagnetice (parametrii nominali) pentru care a fost proiectat și construit motorul electric.

În acționările electrice este necesară adesea folosirea motoarelor la parametri diferiți de cei nominali.

Caracteristicile artificiale sînt caracteristici mecanice obținute pentru condiții de funcționare (parametri) diferite de cele nominale.

Caracteristici artificiale se obțin prin:

— modificarea parametrilor electrici și magnetici ai electomotorului;

— suprapunerea caracteristicilor mecanice a două sau mai multe motoare care sînt cuplate mecanic;

— folosirea unor elemente combinate cu rezistențe, reactanțe și capacități pentru scheme speciale de conectare.

---

* Prin „manevrarea" motoarelor se vor înțelege operațiile elementare de pornire, frînare, varierea vitezei și inversarea sensului de rotație.

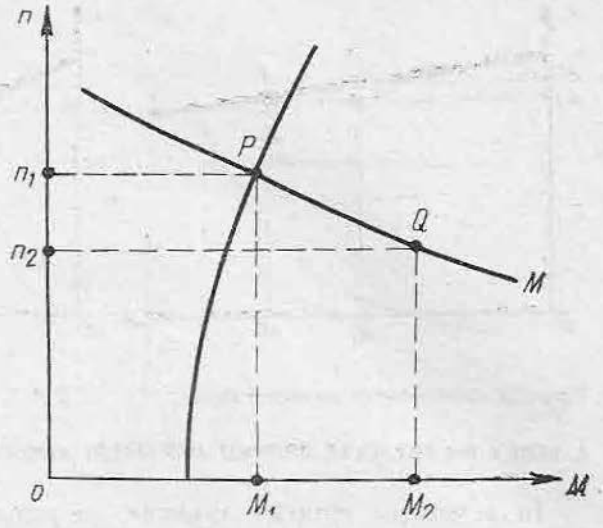


Fig. 12.1. Caracteristica mecanică a unui electromotor de c.c. cu excitație separată.

Caracteristicile mecanice în valori relative. Parametrii unui motor electric pot fi exprimați fie în valori absolute, fie în valori relative raportate la valorile nominale (considerate procentual).

Exemple: — *valoarea relativă a cuplului* este:

$$\mu(\%) = 100\frac{M}{M_n};$$

— *valoarea relativă a turației* raportată la turația de mers în gol n_0 este:

$$\nu(\%) = 100\frac{n}{n_0}.$$

Avantajul folosirii caracteristicilor mecanice întocmite cu valori relative constă în faptul că se pot trasa caracteristici valabile pentru o serie de motoare.

Caracteristici mecanice rigide și suple.

Caracteristicile mecanice la care turația se modifică foarte puțin cînd cuplul variază în limite largi se numesc **caracteristici rigide.**

Caracteristicile mecanice la care turația se modifică mult cînd cuplul variază în limite largi, se numesc **caracteristici suple.**

Comparația între două caracteristici, una mai puțin rigidă (fig. 12.3) și alta mai rigidă (fig. 12.2), se face prin măsurarea pantei acestora (unghiurile ABC, respectiv $A'B'C'$). Rigiditatea se măsoară prin raportul:

$$R = -\frac{\Delta M}{\Delta n} = -\frac{M_2 - M_1}{n_2 - n_1},$$

în fiecare punct de funcționare și reprezintă tangenta trigonometrică a unghiului ρ din figura 12.3.

Exemple: mașinile-unelte de prelucrare a metalelor folosesc motoare cu caracteristici rigide; tracțiunea electrică folosește motoare cu caracteristici suple etc.

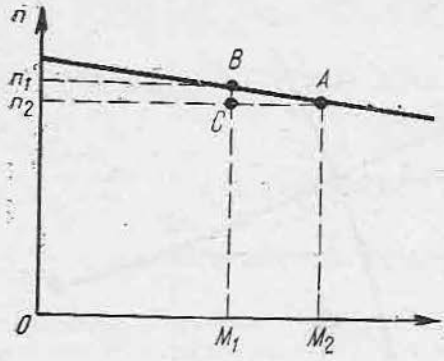


Fig. 12.2. Caracteristică mecanică rigidă.

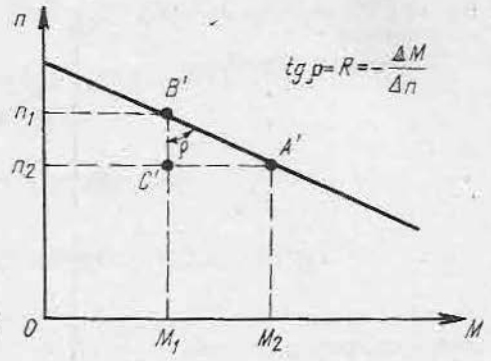


Fig. 12.3. Caracteristică mecanică suplă.

2. INDICI DE CALITATE PENTRU ACȚIONĂRI ELECTRICE CU VARIAȚIE DE TURAȚIE

În acționările electrice moderne, ca urmare a necesităților proceselor tehnologice complexe, este necesară posibilitatea varierii vitezei. *Varierea de viteză reprezintă funcționarea motorului electric la viteze diferite de viteza nominală;* acest lucru se realizează trecînd funcționarea motorului de pe caracteristica naturală pe diversele caracteristici artificiale.

Varierea de viteză este caracterizată printr-o serie de indici de calitate, care sînt descriși în cele ce urmează prin definiții și exemple.

Gama de reglaj reprezintă raportul între viteza minimă și cea maximă la care funcționează un motor electric.

Exemplu: domeniul de variație al vitezei motorului de c.c. la mașina de aglomerare este cuprins între 300 și 1 500 rot/min. Gama de reglaj este prin urmare 1: 5.

Sensul variației vitezei indică sensul în care se poate varia viteza, considerînd ca reper viteza de mers în gol din caracteristica naturală a motorului electric.

Exemple: considerînd că viteza de mers în gol a motorului din exemplul precedent este de 1 500 rot/min, pentru mașina de aglomerare se asigură o variație într-un singur sens, și anume sub viteza de mers în gol *(variație monozonală)*. Tot pentru motoarele de curent continuu se întîlnesc *variații bizonale*, în care viteza este variată atît sub, cît și peste viteza de mers în gol.

Pentru motoarele asincrone se întîlnesc noțiunile de variație de *viteză subsincronă* sau *suprasincronă*, după sensul de variație raportat la viteza de sincronism.

Finețea variației de viteză este un indice care reprezintă modul în care se face trecerea prin diferitele valori ale variației de viteză.

O variație de viteză discontinuă (în trepte) prezintă o finețe redusă.

Finețea maximă a variației de viteză se realizează în scheme de acționare în curent continuu la care se folosesc potențiometre de comandă cu un un număr de trepte practic nelimitat.

Variația cuplului admisibil în domeniul de variație a vitezei indică felul în care cuplul motorului acoperă variația cuplului static. Este un indice care

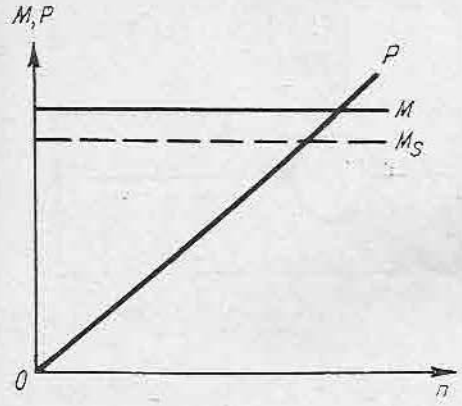


Fig. 12.4. Variația de viteză la cuplu constant.

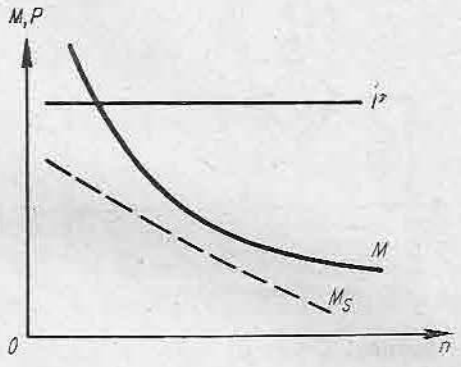


Fig. 12.5. Variația de viteză la putere constantă.

permite alegerea celei mai economice soluții în ceea ce privește randamentul și factorul de putere.

Exemplul 1: În figura 12.4 se reprezintă (punctat) caracteristica unei mașini de lucru (M_s) pentru care se alege un cuplu motor (M) constant; la aceste motoare, valoarea cuplului (figurată plin) rămîne practic constantă, iar puterea variază după o dreaptă trecînd prin origine. Este o *variație de turație cu cuplu constant.*

Exemplul 2: În figura 12.5 cuplul static (reprezentat punctat) este acoperit de cuplul admisibil al unui motor în care cuplul variază. Indiferent de turație, puterea P la arborele motorului rămîne neschimbată, în timp ce cuplul scade la același raport în care turația crește. Este o *variație de turație cu putere constantă.*

Randamentul instalației pentru variația de turație apreciază economicitatea diferitelor metode folosite. Acest indice ține seama de pierderile de energie rezultate și permite alegerea unei metode optime.

Raportul dintre variația turației de mers în gol și a turației de mers în sarcină este un indice care se obține pe baza valorii rigidității caracteristicii mecanice.

B. MOTORUL DE C.C. CU EXCITAȚIE SEPARATĂ ȘI CU EXCITAȚIE DERIVAȚIE

1. DATE PRINCIPALE

În figurile 12.6 și 12.7 sînt redate schemele electrice ale unui electromotor de c.c. cu excitație separată (sau independentă), respectiv derivație.

Se consideră o rețea de curent continuu cu tensiunea U. Înfășurării de excitație (statorului) îi este aplicată o tensiune separată U_e, respectiv, tensiunea U în conectare derivație sau șunt. Curentul de excitație este notat cu i_e. Înfășurarea de excitație este distribuită pe un număr p de perechi de poli, producînd un flux Φ rezultant pe pol.

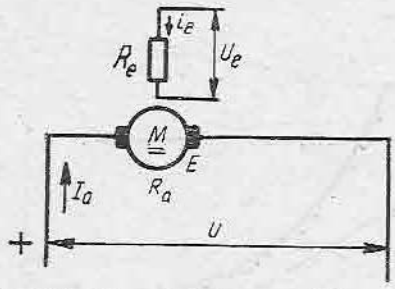


Fig. 12.6. Schema electromotorului de c.c. cu excitație separată.

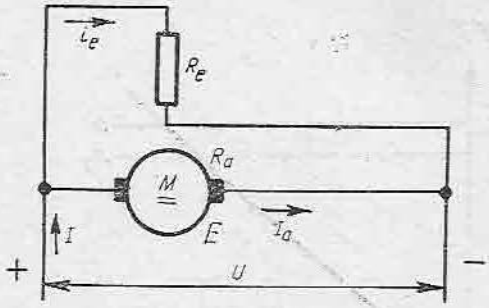


Fig. 12.7. Schema electromotorului de c.c. cu excitație derivație.

Indusul (rotorul) care se rotește cu o viteză de n rot/min este bobinat cu un număr a de căi de curent, formate din N conductoare care au o rezistență proprie R_i.

Curentul prin indus I_a întîlnește în calea sa atît rezistența proprie a indusului cît și pe cea a periilor, a înfășurărilor de compensație, precum și pe a polilor auxiliari; suma acestor rezistențe este notată cu R_a și se numește **rezistența indusului.**

Tensiunea electromotoare E, **indusă** în înfășurarea rotorului se exprimă prin relația:

$$E = \frac{1}{60}\frac{p}{a} N n \Phi = C_e n \Phi. \tag{12.1}$$

Mărimea $C_e = \frac{1}{60}\frac{p}{a} N$ este specifică fiecărui electromotor și se numește *constanta electrică.*

Cuplul motorului M rezultă din interacțiunea cîmpurilor indusului și de excitație și este dat de relația:

$$M = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{p}{a} N I_a \Phi = C_m I_a \Phi. \tag{12.2}$$

Mărimea $C_m = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{p}{a} N$ este specifică fiecărui electromotor și se numește *constanta mecanică.*

Curentul din indusul motorului este dat de raportul:

$$I_a = \frac{U - E}{R_a}. \tag{12.3}$$

Observații:

1) Rapoartele constantelor C_e și C_m ale fiecărui electromotor, au aceeași valoare

$$\frac{C_e}{C_m} = \frac{\frac{1}{60}\frac{p}{a} N}{\frac{1}{2\pi}\frac{p}{a} N} = 0{,}105.$$

2) Raportul constantelor C_e și C_m mai poate fi exprimat și sub forma (din 12.1 și 12.2):

$$\frac{C_e}{C_m} = \frac{EI_a}{Mn}.$$

3) Valoarea aproximativă a căderii de tensiune internă $\frac{R_a I_a}{U}$ este de 0,05 pentru motoare pînă la 10 kW, de 0,03 între 10 și 100 kW și de 0,02 peste 100 kW.

4) Curentul de excitație raportat la curentul nominal variază între 1 și 10%; cu cît puterea motorului este mai mare, cu atît curentul de excitație necesar este mai mic.

5) Acționările electrice prevăd, pentru anumite mecanisme, motoare electrice care funcționează în paralel.

Exemple: vagoane cu două osii motoare, portale etc.

Caracteristicile mecanice ale motoarelor de c.c. cu excitație derivație funcționînd în paralel trebuie să fie riguros identice. În caz contrar, pentru aceeași viteză de lucru corespund cupluri diferite.

6) Pentru inversarea sensului de rotație sînt posibile două metode, fie inversînd sensul curentului de excitație i_e, fie inversînd sensul curentului de indus I_a (principal).

La motoarele de c.c. cu excitație derivație se folosește în special inversarea curentului principal; inversarea curentului de excitație poate conduce la supratensiuni.

7) În schemele de comandă ale motoarelor de c.c. cu excitație derivație se montează o rezistență în paralel pe înfășurarea de excitație. Pe această rezistență se produce descărcarea energiei magnetice înmagazinate în înfășurarea de excitație, care are o inductanță proprie ridicată. Ordinul de mărime al acestei rezistențe este de circa trei ori rezistența înfășurării de excitație.

2. CARACTERISTICILE MECANICE ARTIFICIALE ALE MOTOARELOR DE CURENT CONTINUU CU EXCITAȚIE SEPARATĂ ȘI CU EXCITAȚIE DERIVAȚIE

Din relațiile (12.1) și (12.3), *turația* se poate explicita astfel:

$$n = \frac{E}{C_e\Phi} = \frac{U - R_a I_a}{C_e\Phi} = \frac{U}{C_e\Phi} - \frac{R_a I_a}{C_e\Phi} = n_0 - \Delta n, \qquad (12.4)$$

în care:

$n_0 = \frac{U}{C_e\Phi}$ reprezintă *tensiunea de gol* ($I_a = 0 \Rightarrow n = n_0$);

Δn este căderea de turație.

Înlocuind în relația (12.4) valoarea curentului I_a rezultată din (12.2), se obține o altă formă analitică a aceleiași relații [$n = f(M)$]:

$$n = \frac{U}{C_e\Phi} - \frac{R_a M}{C_e C_m \Phi^2} = n_0 - \Delta n.$$

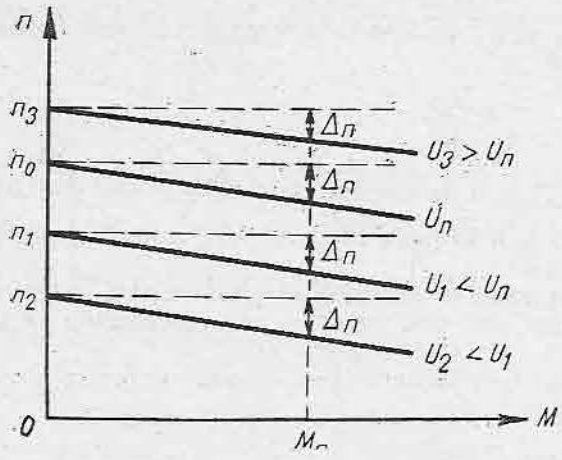


Fig. 12.8. Caracteristici artificiale obținute prin variația tensiunii pentru motorul de c.c. cu excitație separată.

a. Caracteristici artificiale obținute prin variația tensiunii de alimentare

Din relația (12.4) se constată că prin modificarea tensiunii, caracteristicile artificiale obținute se deplasează paralel cu caracteristica naturală (se modifică numai n_0). În figura 12.8 sînt prezentate două caracteristici artificiale obținute prin reducerea tensiunii sub valoarea nominală U_n (U_1, respectiv U_2) și o caracteristică artificială obținută prin mărirea tensiunii (U_3).

În practică se folosește de obicei variația vitezei prin micșorarea tensiunii de alimentare — *reglaj monozonal.*

Pentru același motor, *în cazul excitației separate,* căderea de turație pentru un anumit cuplu M_r este constantă (rigiditatea se menține constantă), iar *în cazul excitației derivație,* curentul de excitație scăzînd proporțional cu tensiunea de alimentare, și căderea de turație se mărește cu cuplul, adică rigiditatea scade.

Gama de reglaj care se poate obține pentru viteze inferioare este 1:10, iar pentru viteze superioare 1:2.

Finețea reglajului depinde de instalația folosită pentru obținerea tensiunii variabile; se folosesc instalații cu tiristoare, cu amplificatoare magnetice, grupuri generator-motor *pentru* a obține o *finețe ridicată* și grupuri redresoare cu variație în trepte *pentru o finețe redusă.*

b. Caracteristici artificiale obținute prin variația rezistenței indusului

Viteza de rotație crește proporțional cu mărimea rezistenței din circuitul rotoric (pentru tensiune de alimentare și flux constante) — v. relația (12.4).

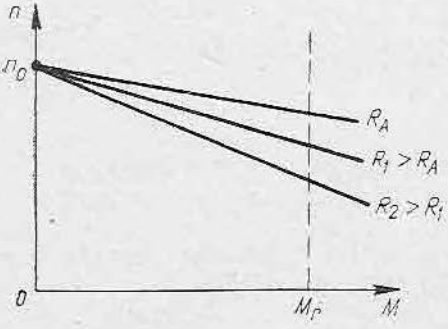


Fig. 12.9. Caracteristici artificiale obținute prin modificarea rezistenței indusului.

Prin modificarea rezistenței indusului, caracteristicile artificiale se rotesc în jurul punctului n_0, mărindu-și panta o dată cu creșterea rezistenței introduse suplimentar în rotor (fig. 12.9).

Introducerea de rezistențe în circuitul rotoric (fig. 12.10) conduce la pierderi de energie și *această metodă de reglaj a vitezei se folosește mai ales pentru pornire.* Pentru motoare mici și pentru durate mici de acționare, această metodă se aplică și pentru reglarea vitezei (*exemplu*: mașini de ridicat, poduri rulante).

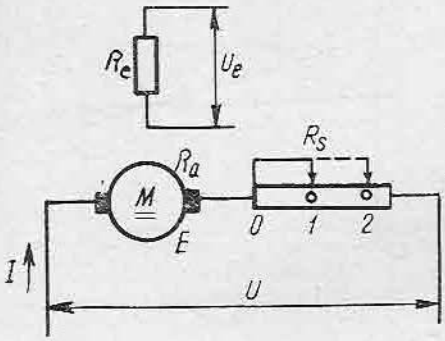


Fig. 12.10. Schema electromotorului de c.c. cu reostat în circuitul indusului.

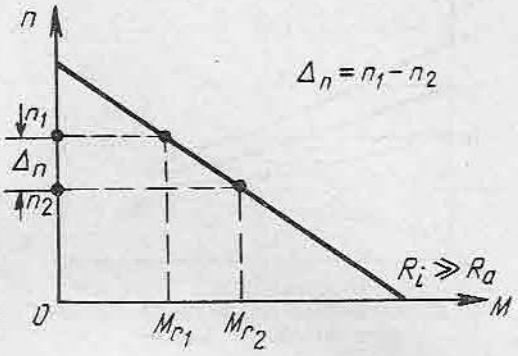


Fig. 12.11. Instabilitatea vitezei pe o caracteristică artificială cu rezistență în circuitul indusului.

Variația turației este monozonală, în domeniul turațiilor inferioare.

Rigiditatea caracteristicilor este invers proporțională cu mărimea rezistenței introduse, ceea ce conduce la instabilitatea turației pentru variații de sarcină mari. Pe caracteristica artificială din figura 12.11, o abatere a cuplului rezistent de la M_{r1} la M_{r2} conduce la o variație de viteză Δn importantă.

Gama de reglaj este redusă în practică la 1:2.

Finețea reglajului depinde de construcția reostatului R_s. Cu un reostat format dintr-o serie de rezistențe metalice, finețea este evident inferioară celei obținute folosind un reostat cu lichid.

c. Caracteristici artificiale obținute prin variația fluxului de excitație

Turația variază în raport de inversă proporționalitate cu fluxul (pentru tensiune de alimentare constantă) — v. relația (12.4).

Prin modificarea fluxului, caracteristica se deplasează și se rotește* față de caracteristica naturală (fig. 12.12).

Observație. În practică, *reglajul turației se face exclusiv monozonal*, prin diminuarea fluxului inductor. Dacă s-ar mări curentul de excitație la o valoare mai mare decît valoarea nominală, bobinajul s-ar supraîncălzi, iar miezul magnetic al polilor inductori ar fi suprasaturat.

Panta caracteristicilor artificiale (Δn pentru același M_r) este cu atît mai accentuată cu cît fluxul este mai diminuat. În practică, se poate ajunge la situația de *răsturnare a reglajului* explicitată în figura 12.13. Caracteristica naturală *1* se intersectează în *P* cu caracteristica artificială *2*, care are rigiditatea scăzută. Pentru un cuplu rezistent M_{r1} se obține o turație n_1 superioară turației nominale n_n; pentru un cuplu rezistent M_{r2} însă, funcționarea se va face la o turație n_2 inferioară celei nominale, iar curentul corespunzător acestui cuplu este mai mare decît curentul nominal.

* Din relația (12.4) se observă că la scăderea fluxului Φ turația de gol n_0 crește invers proporțional cu Φ, iar căderea de turație Δn — invers proporțional cu pătratul aceluiași flux (Φ^2).

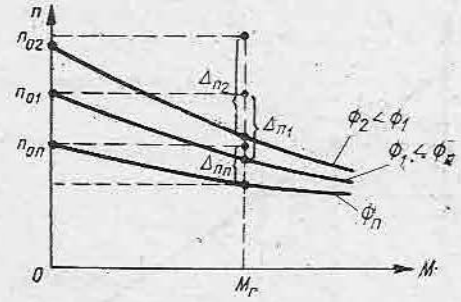


Fig. 12.12. Caracteristici artificiale obținute prin modificarea fluxului.

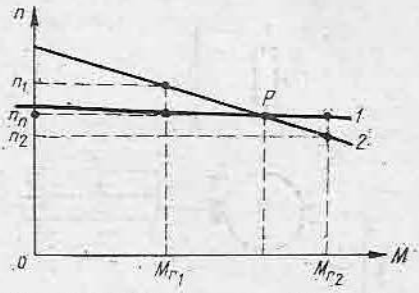


Fig. 12.13. Răsturnarea reglajului de viteză.

Gama de reglaj a turației care se poate obține pentru turații superioare este 1:4.

Finețea reglajului este ridicată, deoarece reostatele de excitație se pot realiza cu o variație continuă.

Varierea turației în funcție de curentul de excitație este specifică fiecărui motor și este dată de constructorul motorului; această curbă [$n = f(i_e)$ pentru $M = ct$, fig. 12.14] servește pentru calculul rezistenței reostatului ales.

Unul din avantajele reglajului turației prin diminuarea fluxului constă în răcirea mai bună obținută la turații ridicate; în acest fel se obține o rezervă pe putere care poate fi folosită.

d. Caracteristici artificiale ale motorului de c.c. cu excitație în derivație obținute prin șuntarea indusului

Șuntarea indusului este o schemă de conectare reprezentată în figura 12.15.

Variația turației se obține prin modificarea rezistențelor legate în serie (R_s) și în derivație (R_d).

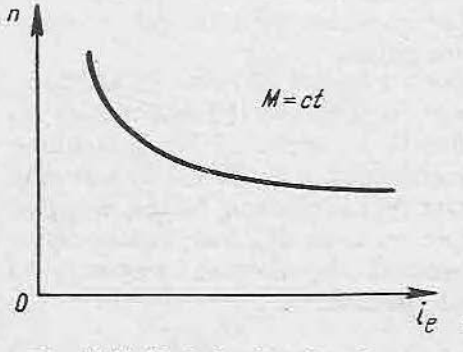


Fig. 12.14. Variația vitezei în funcție de curentul de excitație.

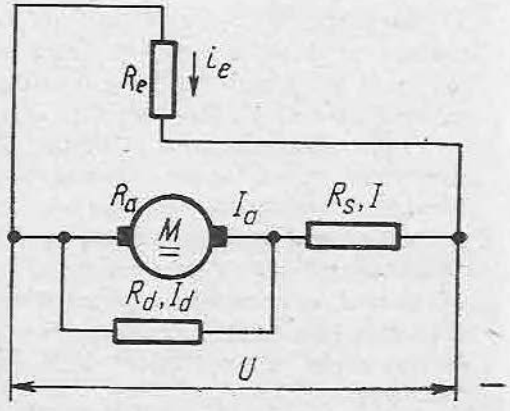


Fig. 12.15. Schemă de acționare cu șuntarea indusului.

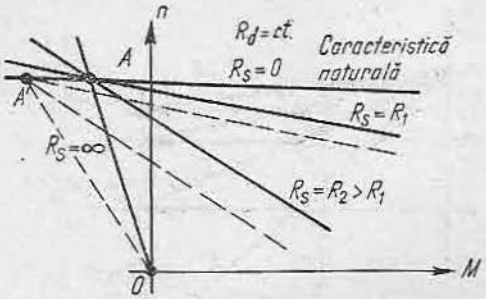


Fig. 12.16. Caracteristici artificiale pentru R_d constantă și R_s variabilă.

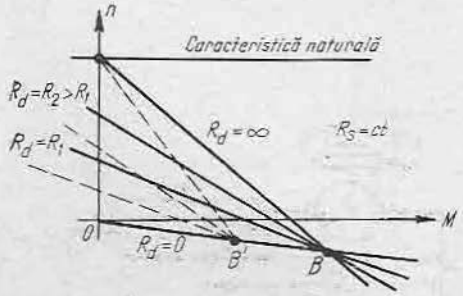


Fig. 12.17. Caracteristici artificiale pentru R_s constantă și R_d variabilă.

Caracteristicile mecanice artificiale care se pot obține sînt reprezentate separat, în figura 12.16 pentru R_d constantă și R_s variabilă, iar în figura 12.17 pentru R_s constantă și R_d variabilă.

Caracteristicile din figura 12.16 sînt obținute prin rotirea caracteristicii naturale în jurul punctului A corespunzător rezistenței constante R_d. Fasciculul de caracteristici este cuprins între caracteristica naturală (pentru $R_s = 0$) și o caracteristică de generator care debitează pe rezistența R_d (pentru $R_s = \infty$, întrerupere de circuit). Pentru o altă valoare a rezistenței R_d punctul A se deplasează pe caracteristica naturală în A' și astfel caracteristicile artificiale pot primi și o mișcare de translație (desenat punctat).

Caracteristicile din figura 12.17 sînt obținute prin rotirea caracteristicii artificiale în jurul punctului B corespunzător rezistenței constante R_s. Fasciculul de caracteristici este mărginit între caracteristica de scurtcircuit (pentru $R_d = 0$) și caracteristica reostatică corespunzătoare lui R_s (pentru $R_d = \infty$, întrerupere de circuit). Pentru o altă valoare a rezistenței R_s, punctul B se deplasează pe caracteristica de scurtcircuit în B' și astfel caracteristicile artificiale pot primi și o mișcare de translație (desenat punctat).

Reglajul de viteză este monozonal, de la viteza nominală spre viteze inferioare.

Gama de reglaj este limitată de randamentul global datorat pierderilor în rezistențele R_s și R_d.

Finețea reglajului este redusă datorită treptelor reostatelor. Variația vitezei se face cu menținerea constantă a cuplului nominal.

3. PORNIREA MOTOARELOR DE CURENT CONTINUU CU EXCITAȚIE SEPARATĂ ȘI CU EXCITAȚIE ÎN DERIVAȚIE

Motoarele de c.c. cu excitație separată și derivație se pornesc cu ajutorul reostatelor de pornire. Rezistențele reostatului limitează curentul de pornire în domeniul valorilor admisibile pentru regimul termic al motorului și pentru acoperirea cuplului rezistent.

Din ecuația echilibrului electric:

$$U = E + R_i I_a = C_e \Phi n + R_i I_a, \qquad (12.5)$$

se observă că curentul absorbit la pornire ($n = 0$) este $I_a = I_p = \frac{U}{R_i}$.

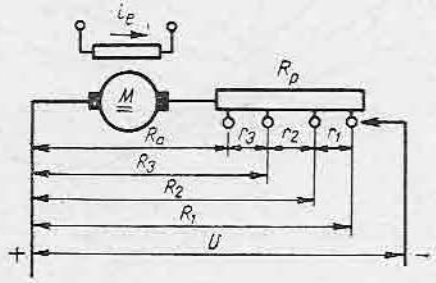


Fig. 12.18. Schema motorului cu excitație separată (derivație) cu reostat de pornire în circuitul indusului.

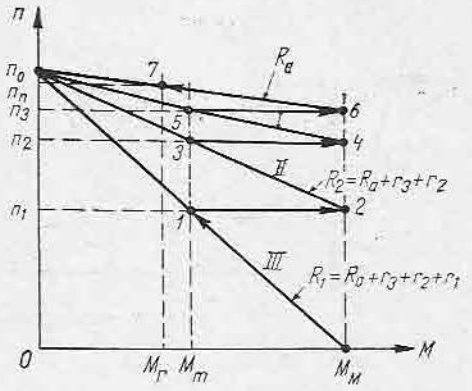


Fig. 12.19. Diagrama pornirii în trepte a unui motor de c.c. cu excitație separată (derivație).

Dar rezistența internă R_i fiind mică, se poate ajunge la curenți de pornire de ordinul 20 I_n (pentru motoarele mari), inadmisibil din punct de vedere termic.

Limitarea mărimii curentului de pornire se face prin pornirea motorului avînd inseriat în circuitul indusului un reostat R_p (fig. 12.18).

Reostatul se compune din trepte de rezistențe r_1, r_2, r_3 cărora le corespund valori de turație stabile pe caracteristici artificiale.

În figura 12.19 se reprezintă **diagrama pornirii în trepte a unui motor cu excitație separată (derivație).***

În momentul cuplării viteza este nulă, tensiunea electromotoare este de asemenea nulă, rezistența indusului este $R_1 = R_a + r_1 + r_2 + r_3$, iar cuplul motor are valoarea maximă M_M.

Motorul pornește și funcționează pe caracteristica artificială *III* pînă în punctul *1* corespunzător vitezei n_1 și unui cuplu minim M_m (superior cuplului rezistent de sarcină — M_r), cînd se scurtcircuitează rezistența r_1. În acest fel, curentul crește din nou pînă la valoarea corespunzătoare cuplului maxim (punctul *2*).

Funcționarea se continuă pe caracteristica artificială *II* și motorul se accelerează pînă în punctul *3*, corespunzător vitezei n_2, cînd se scurtcircuitează rezistența r_2, curentul crescînd din nou pînă la valoarea corespunzătoare cuplului maxim (punctul 4).

Funcționarea trece pe caracteristica artificială *I*; în punctul *5*, corespunzător turației n_3, se scurtcircuitează rezistența r_3.

Motorul trece să funcționeze pe caracteristica naturală pînă la punctul *7*, corespunzător turației nominale n_n și cuplului rezistent M_r.

În figurile 12.20 și 12.21 sînt prezentate variațiile în funcție de timp ale curentului, cuplului și respectiv turației în regimul de pornire.

Scurtcircuitarea rezistențelor de pornire se realizează cu contactoare comandate cu relee de timp, sau manual — cu controlere.

---

* Cele arătate pentru motorul cu excitație separată sînt valabile și pentru cel cu excitație derivație diferențele cantitative fiind practic neglijabile.

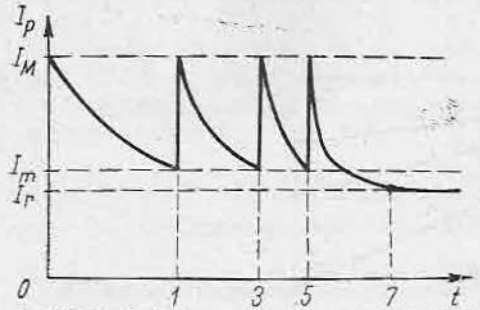


Fig. 12.20. Variația curentului și a cuplului în regim de pornire.

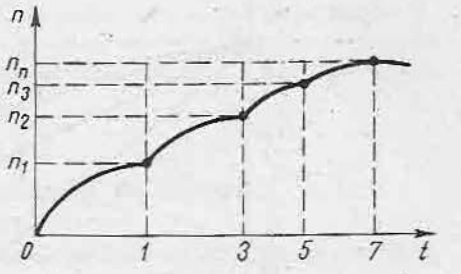


Fig. 12.21. Variația vitezei în regim de pornire.

a. Calculul rezistențelor de pornire prin metoda grafică

Se pornește de la valoarea cunoscută a parametrilor de bază ai motorului, puterea P_n și turația n_n.

Cuplul nominal al motorului;

$$M_n = 9\,550 \frac{P_n}{n_n} \quad [\text{Nm}] \tag{12.6}$$

în care puterea este exprimată în kW, iar viteza în rot/min, trebuie să acopere cuplul rezistent.

Variația cuplului în perioada de pornire se face între cuplul maxim M_M și cuplul minim M_m. Valorile practice ale acestor cupluri se iau astfel:

$$M_M = (2 \ldots 2{,}5)\ M_n;$$

$$M_m = (1{,}05 \ldots 1{,}1)\ M_n.$$

Cu cît M_M este mai apropiat de M_m, pornirea este mai lină, iar șocurile mai mici.

Observație. Valoarea cuplului maxim ales nu poate depăși cuplul maxim admisibil al motorului care este indicat de constructor.

În diagrama din figura 12.22 se fixează valorile calculate pentru M_M, M_m, M_n și n_0, exprimate în valori relative, adică raportate la n_0, respectiv la M_n.

Se trasează caracteristica naturală a motorului trecînd prin n_0 și punctul de coordonate n_n, M_n.

Se trasează caracteristica artificială *III* pentru rezistența maximă introdusă în circuitul indusului. Aceasta trece prin n_0 și prin punctul de coordonate M_M, $n = 0$.

Se determină grafic viteza $\frac{n_1}{n_0}$ de scurtcircuitare a primei trepte de rezistență (punctul *A*).

Prin punctul *B* aflat la intersecția dintre n_1 și M_M se trasează următoarea caracteristică artificială (*II*).

Se determină viteza $\frac{n_2}{n_0}$ de scurtcircuitare a celei de-a doua trepte de rezistență (punctul *C*).

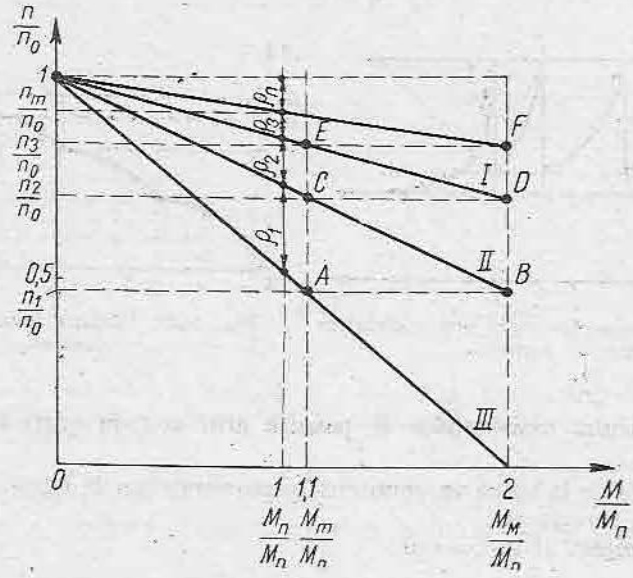


Fig. 12.22. Diagrama pentru calculul grafic al unui reostat cu trei rezistențe.

Prin punctul D aflat la intersecția dintre n_2M_M se trasează ultima caracteristică artificială, I.

În cazul unui reostat cu trei trepte, orizontala care trece prin punctul E trebuie să întîlnească caracteristica naturală în punctul F pe verticala cuplului M_M. În caz contrar construcția se reia prin alte *încercări grafice*, variind domeniul $M_M - M_m$*.

Rezistențele relative din circuitul indusului sînt proporționale cu mărimea segmentelor măsurate ale căderilor de turație ρ_1, ρ_2, ρ_3.

Rezistențele astfel determinate sînt relative, adică se obțin prin raportare la rezistența nominală $R_n = \frac{U_n}{I_n}$.

Rezistența internă relativă a motorului fiind

$$\rho_n = \frac{R_a}{R_n},$$

cu ajutorul valorilor ρ_1, ρ_2, ρ_3 măsurate în raport cu intervalul 0 ... 1 de pe axa ordonatelor, luat ca unitate de măsură, se calculează rezistențele reostatului astfel:

$$r_1 = \rho_1 R_n;$$

$$r_2 = \rho_2 R_n;$$

$$r_3 = \rho_3 R_n.$$

* Sau, mai simplu, se menține valoarea M_m modificînd numai valoarea momentului M_M.

Notă. Procedeul descris este valabil, indiferent de numărul de trepte de pornire.

Rezistențele de pornire se pot calcula de asemenea și **pe cale analitică.** Metoda analitică, ca și metoda grafică, se bazează pe proporționalitatea dintre rezistențele relative din circuitul indusului și căderile de viteză produse de aceste rezistențe.

b. Comanda scurtcircuitării treptelor de rezistență

Comanda se efectuează manual prin controlere cu contacte, fie în circuitul de forță, fie în circuitele de comandă ale unor contactoare.

Comanda se efectuează automat în cazul în care operatorului i se cere să dea primul impuls, după care scurtcircuitarea treptelor de rezistențe decurge fără altă intervenție.

Rezistențele din circuitul indusului sînt construite pentru a fi folosite numai pentru *pornire* sau pentru *pornire și reglaj.*

Rezistențele construite numai pentru pornire sînt instabile termic, adică se ard în cazul în care sînt lăsate în circuit pentru durate de timp mai mari decît cele corespunzătoare capacității lor termice.

4. FRÎNAREA MOTOARELOR DE CURENT CONTINUU CU EXCITAȚIE SEPARATĂ ȘI EXCITAȚIE DERIVAȚIE

Frînarea (oprirea) motorului electric poate decurge în următoarele moduri:

— *natural,* prin întreruperea voită a circuitului de alimentare și continuarea rotirii axului din inerție (*exemplu*: motorul de polizor);

— *natural,* prin întreruperea voită a circuitului de alimentare, dar cu frînare mecanică obținută prin dispozitiv electric (frînă cu electromagnet) sau electrohidraulic (ridicător de frînă electrohidraulic) (*exemple*: cărucioare transbordoare, transportoare cu bandă, ascensoare etc.);

— *la avarie,* prin întreruperea circuitului de alimentare prin siguranțe cu fuzibile, relee termice, relee de tensiune, relee de curent, supraveghetor de turație;

— *la avarie,* prin declanșare voită cu întrerupătoare de avarie, limitatoare de cursă sau butoane;

— *forțat,* cu reducerea timpului de oprire, prin inversarea polarității tensiunii de alimentare;

— *forțat,* cu reducerea timpului de oprire, prin trecerea motorului în regim de generator care debitează pe o rezistență exterioară;

— *forțat,* cu reducerea timpului de oprire, prin trecerea motorului în regim de generator în rețeaua proprie de alimentare.

În toate modurile de oprire, energia cinetică acumulată de masele în mișcare trebuie consumată.

Alegerea modului de oprire este impusă de condițiile procesului tehnologic, protecția muncii, criterii economice și posibilități de realizare ale utilajelor.

Deosebit de importante pentru acționările moderne sînt *frînările forțate.*

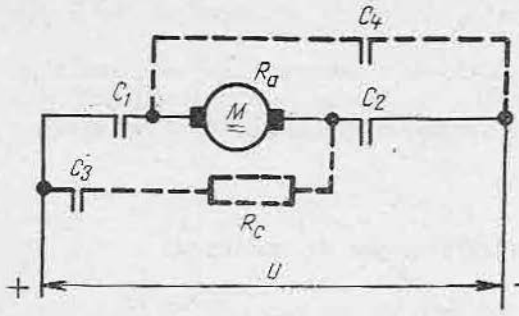


Fig. 12.23. Schemă de contraconectare cu comutarea polarității tensiunii aplicate indusului.

a. **Frînarea prin contraconectare (contracurent)**

● **Frînarea cu comutarea polarității tensiunii aplicate indusului** (fig. 12.23). Un exemplu îl constituie *acționarea unui mecanism de translație.*

În funcționarea normală sînt închise contactele C_1 și C_2.

La contraconectare:

— C_1 și C_2 se deschid, iar contactele C_3 și C_4 se închid, introducînd și rezistența de frînare R_c;

— tensiunea U aplicată indusului își schimbă sensul;

— tensiunea electromotoare E își păstrează sensul, devenind complementară tensiunii indusului cu care se adună;

— turația n își păstrează sensul datorită maselor inerțiale;

— U și E debitează împreună pe rezistența din circuitul indusului;

— momentul motor își schimbă sensul.

În figura 12.24 se explică modul în care decurge frînarea. De pe caracteristica de funcționare, punctul M_1, n_1 funcționarea se transferă la contraconectare pe caracteristica de frînare la aceeași turație n_1, dar avînd un cuplu (de frînare) M_2 cu sens schimbat și mai mare decît M_1. Caracteristica de frînare este paralelă cu caracteristica artificială obținută pentru $R_a + R_c$ (trece prin punctele $-n_0$ și $-M_p$). Oprirea se face în punctul O, înainte ca turația să-și schimbe sensul.

Pentru reducerea curentului corespunzător cuplului de frînare $-M_2$, care este mai mare decît curentul de pornire, a fost necesar ca în circuitul indusului să se introducă rezistența suplimentară R_c, pentru frînare.

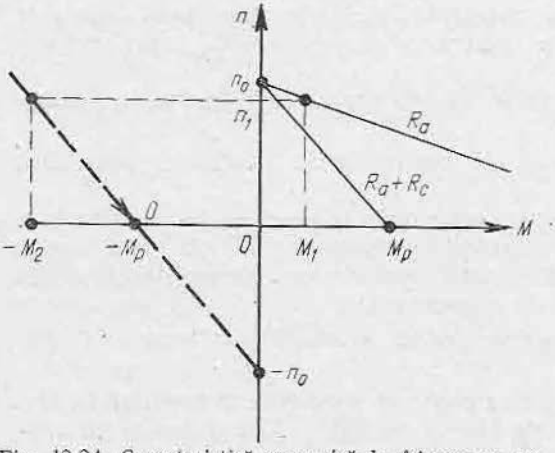


Fig. 12.24. Caracteristică mecanică la frînare cu comutare.

Ecuația echilibrului electric este

$$-U = E + RI_a,$$

în care: $R = R_a + R_c$,
de unde rezultă:

$$I_a = -\frac{E+U}{R}.$$

Ecuația caracteristicii mecanice de frînare este

$$n = -n_0 + \frac{R}{C_e} I_a.$$

Avantajul metodei îl constituie realizarea unei frînări intense.

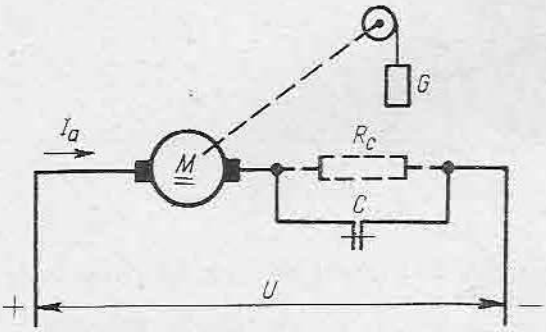


Fig. 12.25. Schemă de contraconectare cu funcționare pe o caracteristică puternic căzătoare.

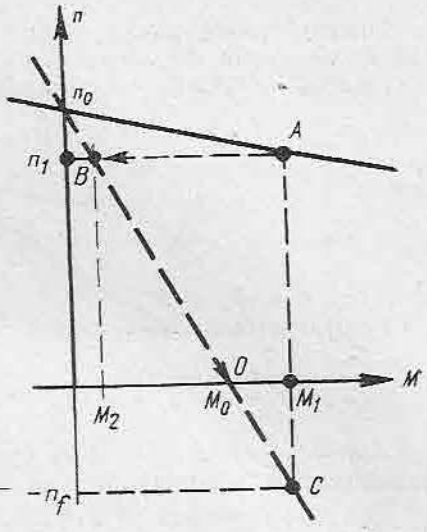


Fig. 12.26. Caracteristica mecanică la contraconectare pe o caracteristică artificială puternic căzătoare.

Dezavantajele sînt următoarele:

— energia de frînare se consumă prin efect termic pe rezistențe suplimentare și nu poate fi recuperată;

— necesitatea controlării punctului de oprire pentru deconectarea motorului*.

● **Frînarea cu funcționare pe o caracteristică artificială puternic căzătoare** (fig. 12.25). Un exemplu îl constituie *acționarea unui mecanism de ridicare — coborîre.*

În funcționarea normală contactul C scurtcircuitează rezistența R_c.

La frînare contactul C se deschide și rezistența R_c se introduce în circuitul indusului. În acest mod:

— tensiunea U aplicată indusului își păstrează sensul;

— tensiunea elcctromotoare E își păstrează sensul însă începe să scadă odată cu scăderea turației;

— turația n începe să scadă, turația finală n_f fiind în domeniul turațiilor negative*.

Caracteristica din figura 12.26 explică modul în care decurge frînarea.

De pe caracteristica naturală (punctul A de coordonate M_1, n_1) funcționarea se transferă pe caracteristica artificială de coborîre (punctul B) la aceeași viteză n_1, dar la un cuplu M_2 redus care nu acoperă cuplul rezistent. Motorul își încetinește viteza și trebuie oprit în punctul O. Altfel punctul de funcționare pentru coborîre se stabilește la turația $-n_f$ (punctul C în cadranul IV).

* cu condiția ca R_c să fie suficient de mare, adică să asigure un moment de oprire M_0 inferior valorii $M_1 (M_0 < M_1)$.

Curentul corespunzător coborîrii își păstrează sensul și se consumă parțial în rezistența din circuitul indusului.

Ecuația echilibrului electric este

$$U = E + RI_a$$

deci:

$$I_a = \frac{U - E}{R},$$

în care: $R = R_a + R_c$.

Ecuația caracteristicii mecanice de coborîre:

$$n = n_0 - \frac{R}{C_e C_m} M.$$

Avantajul metodei constă în obținerea unei frînări line prin alegerea corespunzătoare a rezistențelor suplimentare.

Energia consumată prin efect termic și care nu poate fi recuperată reprezintă un dezavantaj.

b. Frînarea cu recuperarea energiei electrice

Spre exemplu, *vehiculele cu tracțiune electrice* (locomotive, tramvaie, troleibuze) *circulînd pe pante de coborîre, trebuie frînate în modul cel mai economic.* La acestea, *în regim de frînare recuperativ*:

— conectarea motorului rămîne neschimbată față de funcționarea la mers în linie dreaptă sau la urcarea pantelor;

— tensiunea U aplicată indusului își păstrează sensul;

— tensiunea electromotoare E își păstrează sensul, dar devine mai mare decît tensiunea rețelei (mașina trece în regim de generator);

— turația n își păstrează sensul; motorul se accelerează, trece prin punctul de turație n_0 (turația de mers în gol) și o depășește. Accelerația se datorește componentei forței gravitaționale care se aplică corpurilor aflate în mișcare pe o pantă de coborîre, adică momentul sarcinii și-a schimbat sensul (moment activ, în loc de moment rezistent).

Observație. Regimul recuperativ se obține prin accelerarea peste turația de mers în gol atît pentru valori superioare lui $+n_0$ (conectare directă), cît și pentru valori inferioare lui $-n_0$ (conectare inversă).

Caracteristicile de frînare din figura 12.27 explică modul în care se produce frînarea.

Motorul unui vehicul care funcționează în *linie orizontală* funcționează pe caracteristica naturală (*1*), în punctul A de coordonate n_1, M_1. *La coborîrea unei pante,* vehiculul accelerează, turația crește de la n_1 la n_2 (trecînd prin n_0 pe aceeași caracteristică). Cuplul M_2 corespunzător fiind negativ, produce frînarea. Funcționînd pe o caracteristică artificială *2* (cu rezistență suplimentară introdusă în circuitul indusului), cuplul de frînare M_3 atins la turația de coborîre n_2 va fi mai redus. În concluzie, frînarea cea mai puternică se obține pe caracteristica naturală.

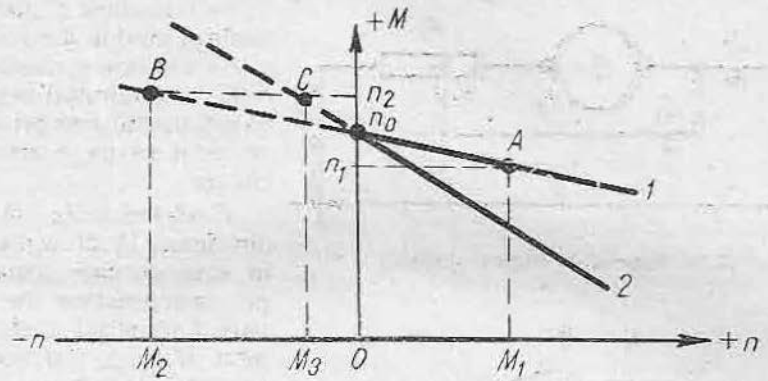


Fig. 12.27. Caracteristicile mecanice ale regimului de frînare recuperativ.

Curentul din indus:

$$I_a = \frac{U - E}{R}$$

își schimbă polaritatea *, deoarece t.e.m. $E = C_e n$ devine superioară tensiunii rețelei $U = C_e n_0$, deci $n > n_0$.

Motorul trece în regim de generator.

Ecuația caracteristicii mecanice este

$$n = n_0 + \frac{R}{C_e C_m} \cdot M.$$

Performanțele acestei metode de frînare sînt următoarele:

— frînare cu intensitate controlată prin folosirea treptelor reostatului de pornire și reglaj;

— economicitate;

— frînarea se produce numai pentru turații superioare celei de mers în gol.

c. Frînarea dinamică

Frînarea dinamică constă în deconectarea motorului de la rețea și închiderea indusului pe o rezistență (fig. 12.28). Ea este utilizată, de exemplu, *la vehiculele de transport, la mașinile-unelte care necesită o oprire bruscă sau de mare precizie.*

În funcționare normală este închis contactul C_1 și se face o pornire directă sau cu reostatul de pornire în trepte, R_p.

La frînarea dinamică:

— declanșează C_1 și anclanșează C_2, izolîndu-se indusul într-un circuit închis format din rezistența proprie R_a și rezistența exterioară de frînare R_f. Ca rezistență de frînare poate fi folosită o parte din rezistența de pornire și reglaj R_p;

* Pentru $n = n_0$, $I_a = 0$.

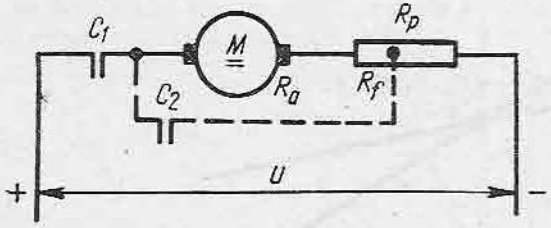


Fig. 12.28. Schema de frînare dinamică.

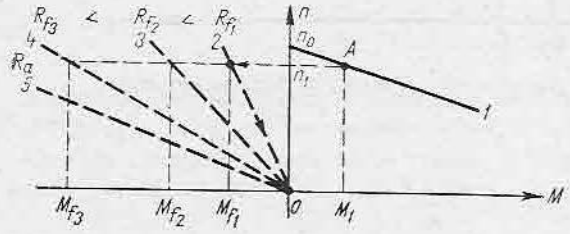


Fig. 12.29. Caracteristici de frînare dinamică.

— tensiunea U devine nulă motorul fiind izolat de la rețea;

— tensiunea electromotoare E rămîne inițial neschimbată și datorită inerției continuă să debiteze pe rezistența din circuit.

Caracteristicile de frînare din figura 12.29 explică modul în care decurge frînarea. De pe caracteristica de funcționare *1* (punctul *A* de coordonate M_1, n_1), funcționarea se transferă, la frînarea dinamică, pe caracteristica *2*, corespunzătoare unei rezistențe de frînare R_{f1}. Cuplul corespunzător M_{f1} este negativ și produce frînarea. T.e.m. se reduce și — corespunzător — și turația se reduce pînă la oprire.

Curentul din indus este determinat numai de mărimea t.e.m. și de rezistența din circuitul indusului:

$$I_a = \frac{E}{R_a + R_f}.$$

Valoarea maximă a curentului este atinsă în primul moment, adică la deconectarea de la rețea.

Ecuația caracteristicii mecanice de frînare dinamică este:

$$n = \frac{R}{C_e C_m} M_f.$$

Notă. Toate caracteristicile artificiale trec prin originea coordonatelor.

Observație. Pentru o viteză de funcționare n_1 stabilită, produsul dintre cuplul de frînare și rezistență este constant ($M_f \cdot R_f = C_e C_m n_1 = \text{const}$), deci cu cît R_f este mai mică, cu atît cuplul de frînare M_f este mai puternic (vezi caracteristicile *3*, *4*, *5* din fig. 12.29).

Conform celor arătate mai sus, efectul de frînare dinamică maxim s-ar produce în cazul conectării în scurtcircuit a indusului; practic, acest procedeu este evitat datorită șocurilor mecanice și electrice inadmisibile.

Performanțele acestei metode de frînare sînt:

— frînarea intensă, cu posibilitate de control reostatic;

— precizie;

— energie disipată prin efect termic nerecuperabilă.

5. VARIEREA VITEZEI MOTOARELOR DE CURENT CONTINUU CU EXCITAȚIE SEPARATĂ (DERIVAȚIE)

Varierea vitezei acestor tipuri de motoare se realizează practic prin următoarele metode:

— *modificarea rezistenței reostatului introdus în circuitul rotoric* (v. fig. 12.18 și fig. 12.19);

— *modificarea curentului de excitație* (v. fig. 12.12).

Sînt folosite aceleași scheme aplicate și în cazul pornirii (v. paragraful 3), cu mențiunea că rezistențele folosite trebuie să fie stabile termic (să reziste timp nelimitat la valorile curenților ce străbat rezistențele respective).

C. MOTORUL DE C.C. CU EXCITAȚIE SERIE

1. DATE PRINCIPALE

În figura 12.30 este prezentată schema electrică a unui electromotor de c.c., cu excitație serie.

Alimentarea se face de la rețeaua de c.c. cu tensiune constantă U.

Înfășurarea de excitație avînd rezistența R_e este legată în serie cu înfășurarea indusului. Curentul principal I străbate atît indusul, cît și înfășurarea de excitație.

Observație. Spre deosebire de fluxul de excitație constant al motoarelor de c.c. cu excitație separată sau derivație, fluxul inductor Φ produs de polii motorului de c.c. cu excitație în serie este variabil și depinde de mărimea curentului principal:

$$\Phi = f(I).$$

Această relație nu se poate exprima matematic, ea constituind o curbă caracteristică a fiecărui motor * (v. fig. 12.31). Curba respectivă poate fi despărțită în două porțiuni:

— pînă în punctul A — *zona de proporționalitate*

$$\Phi_1 = \alpha_1 I_1,$$

cînd fluxul crește proporțional cu mărimea curentului, α_1 fiind constantă care depinde de panta curbei;

— de la punctul A — *zona de saturare*, în care fluxul rămîne practic constant:

$$\Phi_2 = \alpha_2 I_2,$$

iar coeficientul** α_2 devine variabil și tinde spre o valoare constantă (practic zero) pe măsură ce curentul crește.

---

* La altă scară este chiar curba de magnetizare $B = f(H)$.

** La altă scară coeficientul α reprezintă permeabilitatea magnetică a fierului motorului.

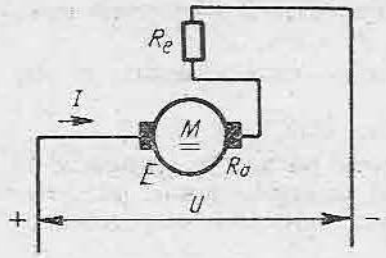


Fig. 12.30. Schema motorului de c.c. cu excitație serie.

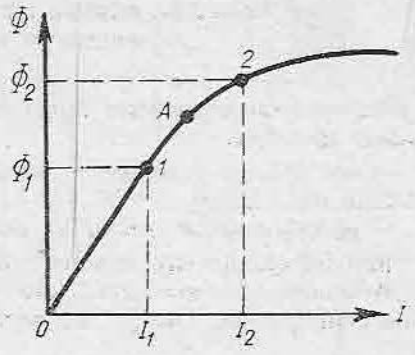


Fig. 12.31. Dependența fluxului magnetic de curentul de excitație la o mașină de c.c. serie (curba de magnetizare).

Ecuația echilibrului electric este:

$$U = E + R_a I, \tag{12.7}$$

în care R_a include atît rezistența indusului R_i, cît și rezistența înfășurării de excitație R_e.

Tensiunea electromotoare:

$$E = C_e \Phi_n \tag{12.8}$$

este în acest caz o funcție de doi parametri, atît fluxul cît și viteza fiind mărimi variabile. Înlocuind (12.8) în (12.7) se obține:

$$U = C_e \Phi n + R_a I. \tag{12.9}$$

Ecuația echilibrului mecanic este:

$$M = C_m \Phi I, \tag{12.10}$$

C_e și C_m fiind constantele electrică, respectiv mecanică, ale motorului.

2. CARACTERISTICA NATURALĂ A MOTORULUI DE CURENT CONTINUU CU EXCITAȚIE SERIE

Caracteristica mecanică naturală a motorului de c.c. cu excitație serie este dată de constructorul motorului. Curba *este o hiperbolă*, ceea ce rezultă astfel:

— în ecuațiile echilibrului electric și mecanic [relațiile (12.9) și (12.10)] se înlocuiește $\Phi = \alpha I$, în care α este coeficientul de proporționalitate variabil, și astfel:

$$U = C_e \alpha I n + R_a I; \tag{12.11}$$

$$M = C_m \alpha I^2; \tag{12.12}$$

— se explicitează I din (12.11) și se înlocuiește în (12.12), rezultînd:

$$M = C_m \alpha \frac{U^2}{(C_e \alpha n + R_a)^2}. \tag{12.13}$$

Concluzie. Ecuația caracteristicii mecanice a motorului serie arată că mărimea cuplului este direct proporțională cu pătratul tensiunii și invers proporțională cu pătratul turației.

Constructorul motorului ridică la platforma de încercări caracteristicile reprezentate în figura 12.32. Curbele sînt date în valori relative:

μ = cuplul M, raportat la cuplul nominal M_n;
ν = turația n, raportată la turația nominală n_n;
i = curentul I raportat la curentul nominal I_n;
η = randamentul, raportat la randamentul nominal.

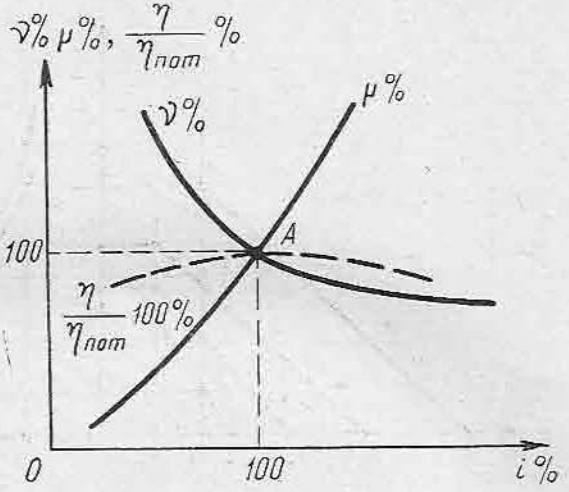


Fig. 12.32. Caracteristicile universale ale motorului de c.c. cu excitație serie.

Motoarele de același tip prezintă curbe foarte apropiate, astfel încît exprimate în valori relative sînt valabile pentru o serie mare; aceste *curbe* se numesc *universale*.

Observații:

1) La pornire, frînare sau suprasarcină, pentru aceeași valoare a curentului, cuplul motorului cu excitație serie este mai mare decît cuplul motorului cu excitație derivație.

2) La cupluri rezistente mici corespund curenți mici și turația tinde să crească la valori inadmisibile, motorul putîndu-se ambala și distruge.

3) La cupluri rezistente mari corespund curenți mari, fluxul tinde spre o valoare de saturație, și deci scăderile de turație se reduc. Caracteristica mecanică devine asemănătoare cu aceea a motoarelor cu excitație în derivație ($i > 100\%$ — fig. 12.32).

4) Motorul de c.c. cu excitație serie nu poate funcționa (teoretic) în regim de frînare recuperativă, deoarece turația de mers în gol este infinită.

3. CARACTERISTICILE ARTIFICIALE ALE MOTORULUI DE CURENT CONTINUU CU EXCITAȚIE SERIE

Funcționarea motorului de c.c. cu excitație serie pe caracteristici artificiale se obține introducînd rezistențe în circuitul indusului. La un curent constant, cuplul și fluxul sînt de asemenea constante și viteza este proporțională cu rezistența:

$$n = \frac{!U - IR_a}{C_e\Phi} = f(R_a).$$

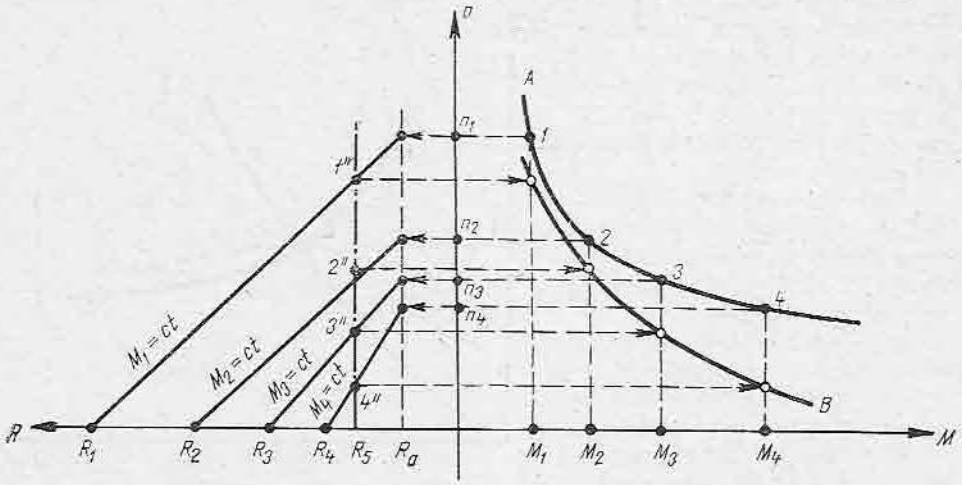


Fig. 12.33. Determinarea grafică a unei caracteristici artificiale pentru motorul de c.c. cu excitație serie.

În figura 12.33 *se determină grafic o* **caracteristică artificială corespunzătoare introducerii unei rezistențe suplimentare în circuitul indusului:**

— se trasează caracteristica naturală A dată de constructor;

— se consideră pe caracteristica naturală cîteva puncte $1 \dots 4$ (n_1 M_1, $n_2 M_2$, n_3 M_3, n_4 M_4);

— în cadranul II se fixează pe abscisă rezistența indusului R_a;

— se construiesc dreptele $n = f(R)$ pentru cuplurile constante $M_1 \dots M_4$; dreptele se construiesc prin două puncte. Primul punct se află la intersecția verticalei prin R_a cu vitezele $n_1 \dots n_4$. Al doilea punct se obține raportînd tensiunea U la curenții $I_1 \dots I_4$ corespunzători cuplurilor $M_1 \dots M_4$ pentru $n = 0$.

$$R_1 = \frac{U}{I_1}; \quad R_2 = \frac{U}{I_2}, \quad R_3 = \frac{U}{I_3}, \quad R_4 = \frac{U}{I_4};$$

— se fixează pe abscisa rezistențelor mărimea R_5 corespunzătoare rezistenței sporite a indusului;

— la intersecția verticalei prin R_5 se determină punctele $1''$, $2''$, $3''$ și $4''$ pentru care sînt cunoscute cuplurile și vitezele; aceste puncte se transpun în cadranul I determinîndu-se caracteristica artificială B corespunzătoare rezistenței R_5.

Observație. Cu cît rezistența conectată în circuitul indusului este mai mare, cu atît căderea de viteză Δn este mai mare și caracteristica este mai căzătoare.

Căderea de turație se calculează pentru un curent absorbit constant I_k, scăzînd ecuațiile caracteristicilor naturale:

$$n_{nat} = \frac{U}{C_e \Phi} - \frac{R_a}{C_e \Phi} I$$

și artificială:

$$n_{art} = \frac{U}{C_e\Phi} - \frac{R_a + R_s}{C_e\Phi} I.$$

Rezultă:

$$\Delta n = aR_s,$$

în care:

$$a = \frac{I_k}{C_d\Phi_k} = \text{ct.}$$

Căderea de viteză este proporțională cu rezistența conectată în circuitul indusului.

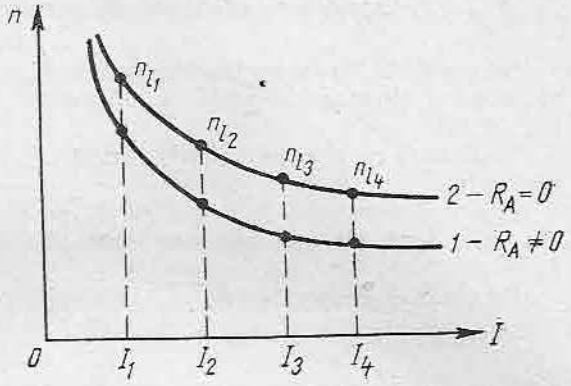


Fig. 12.34. Construcția caracteristicii limită.

O caracteristică artificială importantă este **caracteristica limită a motorului serie.** Ea este o caracteristică fictivă construită pentru $R_a = 0$ și se folosește în calculele regimului tranzitoriu (pornire, frînare, variație de turație).

Caracteristica limită se determină astfel:

— pentru $R_a = 0$, turația limită n_l este:

$$n_l = \frac{U}{C_e\Phi};$$

— introducînd $C_e\Phi = \frac{U}{n_l}$ în ecuația turației, se obține $n_l = \frac{Un}{U - IR_a}$;

— se trasează caracteristica naturală A (fig. 12.34) și pentru punctele $I_1 \dots I_4$ se calculează turațiile limită $n_{l_1} \dots n_{l_4}$;

— se fixează punctele obținute $n_{l_1} \dots n_{l_4}$ pe ordonatele prin $I_1 \dots I_4$ obținîndu-se caracteristica limită.

Notă. *Caracteristica limită este situată deasupra caracteristicii naturale.*

4. PORNIREA MOTORULUI DE CURENT CONTINUU CU EXCITAȚIE SERIE

Motorul de c.c. cu excitație serie se pornește *cu ajutorul reostatului de pornire,* ca și motoarele de c.c. cu excitație derivație sau separată.

Treptele de rezistență limitează curentul de pornire și asigură un cuplu minim suficient pentru accelerare.

În toate metodele de calcul, valoarea *curentului maxim* I_M se limitează:

$$I_M = (2 \dots 2{,}5)\, I_n.$$

Curentul minim I_m corespunzător cuplului necesar pentru accelerare se consideră:

$$I_m = (1{,}5 \dots 1{,}75)\, I_n.$$

a. Calculul rezistențelor de pornire prin metoda grafică

Se pornește de la parametrii nominali ai motorului precum și de la caracteristica naturală N pusă la dispoziție de constructor (curba N din fig. 12.35).

Se fixează pe abscisă valorile limită, I_m și I_M între care variază curentul din indus.

Proiecția punctului S, respectiv R, pe verticala în R_a constituie primul din cele două puncte necesare trasării dreptelor $I_m = \text{ct}$ și respectiv $I_M = \text{ct}$.

Punctul A, respectiv B, se calculează pentru condiția de viteză nulă:

— rezistența în punctul A este $\frac{U}{I_m}$;

— rezistența în punctul B este $\frac{U}{I_M}$.

Se trasează dreapta $I_m = \text{ct}$ între punctele A și I, iar dreapta $I_M = \text{ct}$ între punctele B și H.

Rezistența R_1 în punctul B este și valoarea rezistenței maxime din circuitul indusului, de la care începe pornirea.

Motorul se accelerează pe caracteristica artificială *1* pînă în punctul C (intersecția lui R_1 cu $I_m = \text{ct}$), care se proiectează orizontal în L (segmentul KL), determinînd prima treaptă, în care se scurtcircuitează o primă rezistență a reostatului.

Punctul de funcționare C se transferă în D (respectiv L se transferă în M), la care corespunde o rezistență R_2 în circuitul indusului.

Motorul se accelerează pe caracteristica artificială *2* (segmentul DE, respectiv MN) pînă în punctul E (respectiv N), în care se scurtcircuitează a doua treaptă a reostatului.

La scurtcircuitarea celei de-a treia trepte din punctul G, funcționarea se transferă pe caracteristica naturală N în punctul R și mai departe pînă la T la curentul I_n și turația nominală n_n.

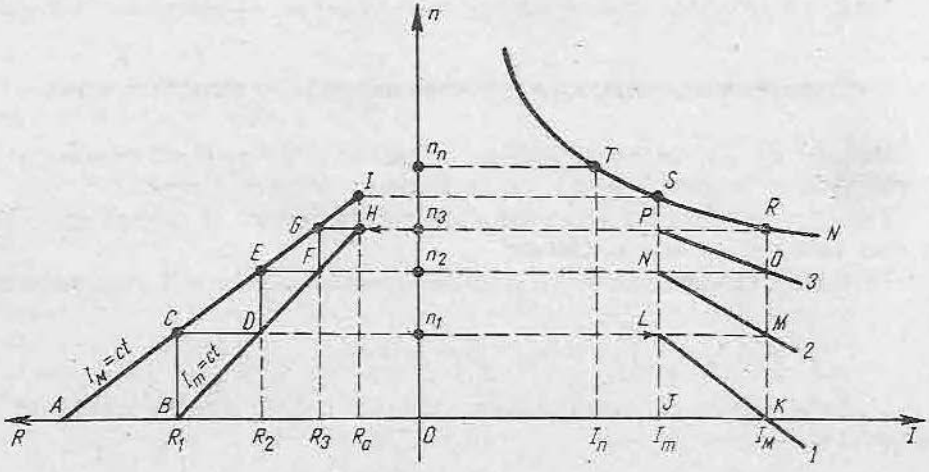


Fig. 12.35. Diagrama de calcul al reostatului prin metoda grafică.

Metoda prezentată se bazează pe încercări grafice care se repetă pînă ce proiecția punctului G coincide cu punctul R de pe caracteristica naturală (schimbarea intervalului $I_m - I_M$).

Notă. Rezistențele de pornire se pot calcula de asemenea pe cale analitică sau grafoanalitică.

5. FRÎNAREA MOTORULUI DE CURENT CONTINUU CU EXCITAȚIE SERIE

a. Frînarea cu recuperarea energiei electrice

Atenție! La motorul serie, *frînarea recuperativă este deosebit de periculoasă datorită discontinuității care există între regimul de motor și regimul de generator.*

Regimul de generator se obține comutînd curentul fie în indus, fie în înfășurarea de excitație. În acest scop este necesar un aparataj complex și manevre sigure, existînd pericolul de ambalare și distrugere a motorului.

Frînarea recuperativă se folosește în exclusivitate în tracțiunea electrică pe cale ferată.

b. Frînarea prin contraconectare

Frînarea *se obține prin introducerea rezistențelor în circuitul indusului în vederea obținerii unor caracteristici puternic căzătoare*; în acest fel, motorul trece în regim de generator din cadranul *I* în cadranul *IV* (fig. 12.36).

— Prin introducerea rezistenței R_1, punctul de funcționare trece pe caracteristica *1* de frînare din punctul B corespunzător turației — n_m, în punctul C, punctul în care rezistența se reduce la valoarea R_2.

— Pe caracteristica *2*, frînarea se face între punctul D și E în care se reduce din nou rezistența de la R_2 la R_3.

— Turația devine nulă în punctul G pe caracteristica *3* de frînare, pe care motorul a decelerat din punctul F.

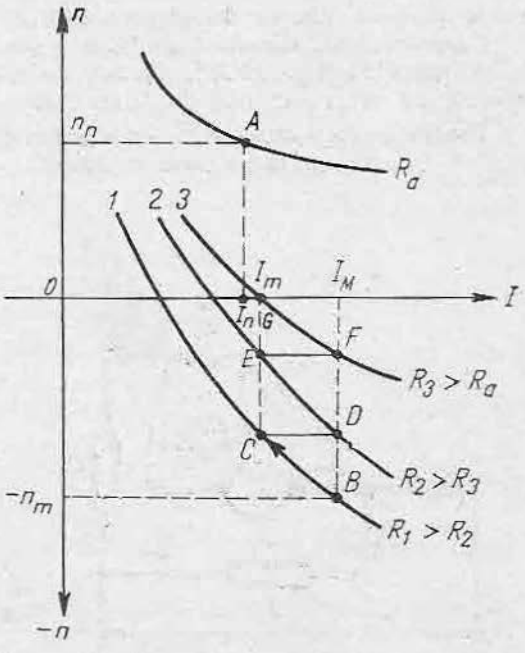


Fig. 12.36. Caracteristicile mecanice la frînare reostatică prin contraconectare a motorului serie

Notă. Frînarea prin contraconectare la motorul serie este mai avantajoasă decît la motorul derivație, deoarece șocurile de curent sînt mai reduse pentru același cuplu de frînare.

Ecuația caracteristicilor mecanice pentru regimul de frînare prin contraconectare este aceeași ca și pentru regimul de motor;

caracteristicile se află în cadranul *IV*, în prelungirea caracteristicilor din cadranul *I*.

Performanțele acestei metode de frînare sînt următoarele:

— frînarea prin contraconectare este intensă și se folosește la reversarea unor mase mari în mișcare de rotație (exemplu: acționarea căilor cu role ale laminoarelor);

— variații mici ale sarcinii produc variații mari de turație; din această cauză, frînarea prin contraconectare nu se folosește la dispozitive de ridicare.

c. Frînarea dinamică

● **Frînarea dinamică cu autoexcitație (fig. 12.37).** *În funcționare normală* sînt închise contactele C_1, C_3 și C_5.

La frînare:

— contactele C_1, C_3 și C_5 se deschid, închizîndu-se simultan C_2, C_4 și C_6. Motorul este deci deconectat de la rețeaua de alimentare și debitează ca generator în circuitul format din rezistența proprie R_a, rezistența de pornire R_p și o rezistență specială de frînare R_f;

— tensiunea electromotoare E rămîne neschimbată în momentul în care începe frînarea;

— curentul de frînare I_f are sensul schimbat față de curentul în regim de motor.

Se observă că fluxul inductor își păstrează sensul, deoarece curentul în înfășurarea de excitație R_e își păstrează de asemenea sensul.

Curentul de frînare I_f scade proporțional cu t.e.m. E, care la rîndul său scade proporțional cu micșorarea turației.

Caracteristicile mecanice ale frînării dinamice cu autoexcitație sînt situate în cadranul *II* (fig. 12.38). Caracteristicile sînt cu atît mai apropiate de abscisă cu cît rezistența de frînare este mai mică.

Pentru aceeași turație n_n, cuplul de frînare M_f obținut pe caracteristica $2(R_p = 0)$ este mai mare decît cuplul M_{f+p} de pe caracteristica *1* corespunză-

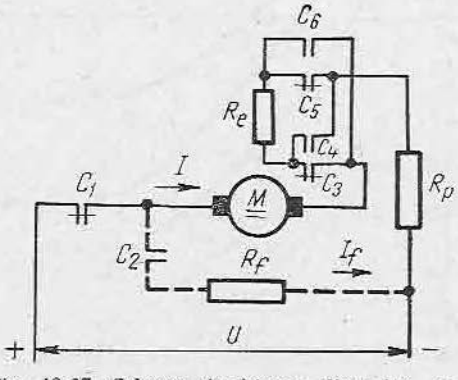


Fig. 12.37. Schema de frînare dinamică cu autoexcitație.

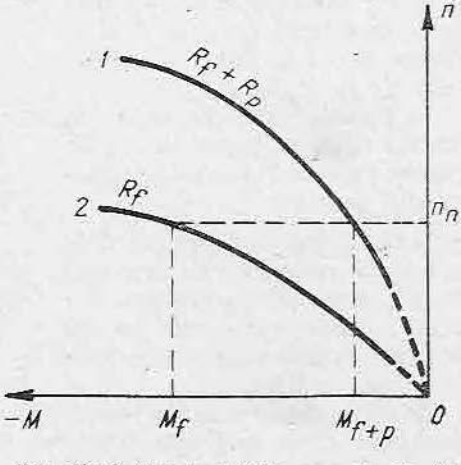


Fig. 12.38. Caracteristicile mecanice la frînare dinamică cu autoexcitație.

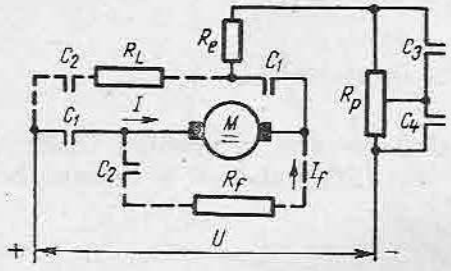


Fig. 12.39. Schemă de frînare dinamică cu excitație independentă.

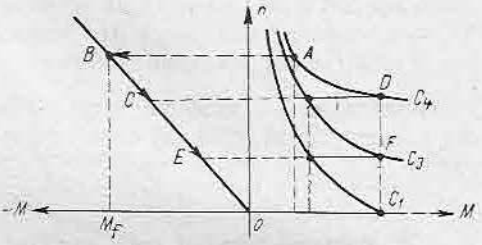


Fig. 12.40. Caracteristicile mecanice la frînare dinamică cu excitație independentă.

toare înserierii rezistenței de pornire R_p cu rezistența de frînare R_f; cuplul de frînare se limitează însă, pentru a nu supune motorul la suprasarcini mecanice.

Observație. *La viteze reduse, efectul frînării dispare și oprirea se face datorită frecărilor din lagăre și inerției mecanismului.*

Performanțele acestei metode sînt:

— frînare intensă, cu posibilitate de control reostatic;

— lipsă de precizie datorită dispariției efectului de frînare înaintea opririi;

— durata timpului de frînare relativ mare.

● **Frînarea dinamică cu excitație independentă (fig. 12.39).** *La pornire* sînt anclanșate succesiv contactoarele C_1, C_3 și C_4 obținîndu-se accelerarea reprezentată în cadranul *I* din figura 12.40.

La frînare contactoarele C_1, C_3, C_4 declanșează și anclanșează C_2.

Motorul este deconectat de la rețea și debitează ca generator pe circuitul format numai din rezistența proprie R_a și rezistența de frînare R_f; înfășurarea de excitație R_e este alimentată independent, printr-o rezistență de limitare a curentului R_L avînd înseriată și rezistența reostatului de pornire R_p.

La excitație constantă se obține *o caracteristică de frînare dreaptă* situată în cadranul *II*, identică cu caracteristica de frînare pentru motorul derivație (v. fig. 12.29):

— turația rămîne în primul moment neschimbată;

— curentul de frînare I_f scade proporțional cu t.e.m., care scade proporțional cu micșorarea vitezei;

— efectul frînării se menține pînă la oprire.

Performanțele metodei sînt următoarele:

— frînare intensă, cu posibilitate de control reostatic;

— precizie;

— timp scurt de frînare.

6. VARIEREA TURAȚIEI MOTORULUI DE CURENT CONTINUU CU EXCITAȚIE SERIE

Posibilitățile de variere a turației rezultă din analizarea termenilor expresiei:

$$n = \frac{U - RI}{C_e \Phi}.$$

Variația turației se obține prin:
— *modificarea tensiunii de alimentare* U;
— *schimbarea rezistenței din circuitul indusului* R;
— *modificarea fluxului inductor.*

Observație. La motorul serie, fluxul și curentul se modifică simultan; din această cauză, reglajul turației este mai complicat decît la motorul derivație.

a. Reglajul turației prin rezistențe înseriate în circuitul principal

La pornirea motorului serie (paragr. C 4) a fost descrisă obținerea caracteristicilor artificiale prin introducerea rezistențelor în circuitul principal.

Reglajul de turație este monozonal.

Precizia reglajului este ridicată la cupluri rezistente mari și redusă la cupluri rezistente mici (pe porțiunea caracteristicii în care turația variază brusc).

Observație. Înserierea rezistențelor în circuitul principal este echivalentă cu o reducere a tensiunii de alimentare.

b. Reglajul turației prin șuntarea indusului

Curentul din înfășurarea de excitație I_e (fig. 12.41) este diferit de curentul din indus I_a.

În situația în care I_a se apropie de zero, la valori mici ale cuplului, curentul de excitație este egal cu curentul I_d din rezistența R_d care șuntează indusul. În acest mod dispare pericolul de ambalare și distrugere a motorului.

Se obține astfel o turație de mers în gol bine determinată.

Ecuația de echilibru electric este:
— la $I_a = 0$; $U = (R_d + R_a)\, I_e$;
— la $I_a \neq 0$ (echilibrul este descris prin trei ecuații)

$$E + R_a I_a = R_d I_d;$$

$$I_e = I_d + I_a;$$

$$U = R_e I_e + R_d I_d.$$

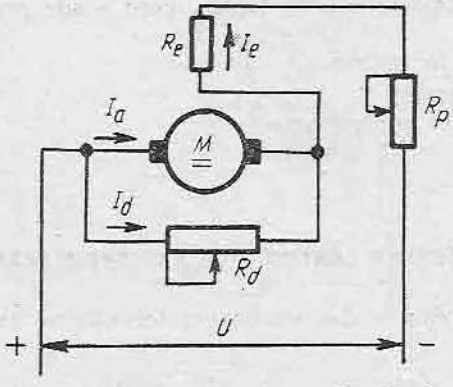


Fig. 12.41. Schema de variere a vitezei prin șuntarea indusului.

În figurile 12.42 și 12.43 sînt redate *caracteristicile artificiale obținute pentru* $R_d = \text{ct}$, *respectiv* $R_e = \text{ct}$. Trasarea acestor curbe este făcută în valori proporționale cu parametrii nominali ai motorului.

Funcționarea este posibilă atît în regim de motor, cît și pentru frînare. La o acționare în care motorul este antrenat de sarcină, funcționarea are loc

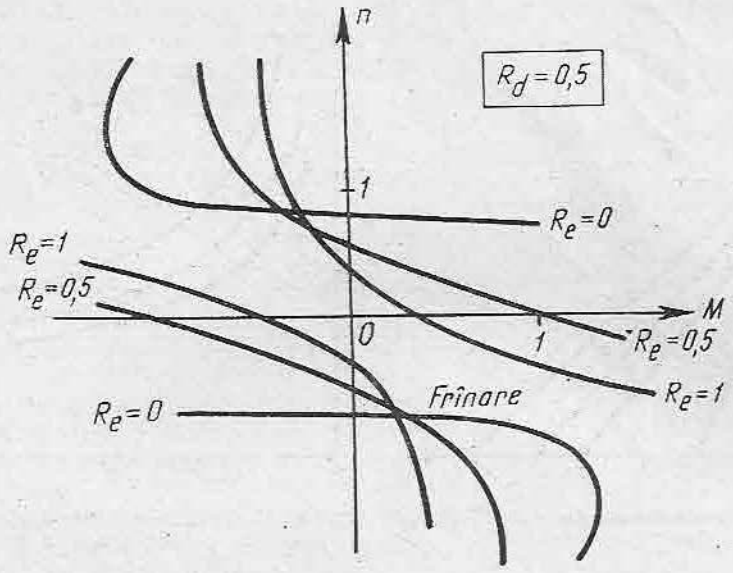


Fig. 12.42. Caracteristici artificiale obținute pentru $R_d = ct$ și R_e variabil.

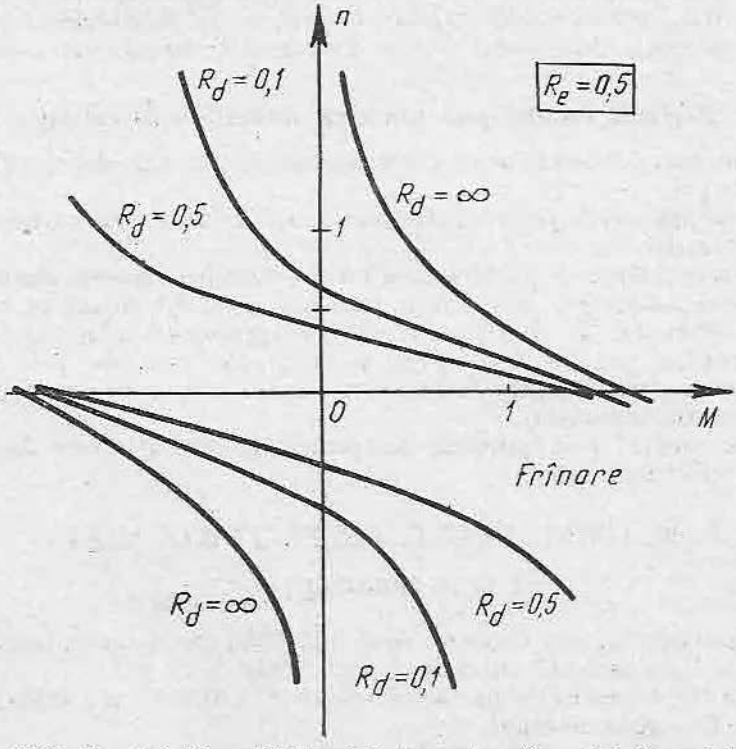


Fig. 12.43. Caracteristici artificiale obținute pentru $R_s = ct$ și R_1 variabil.

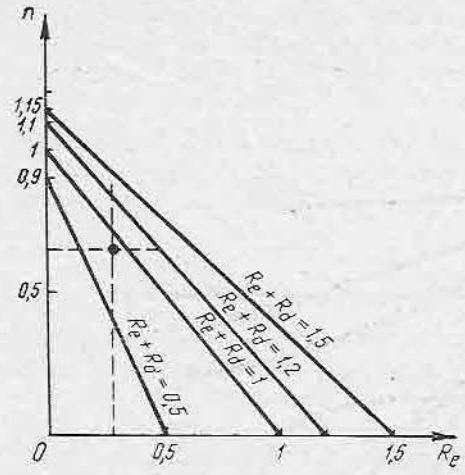


Fig. 12.44. Familie de caracteristici $n = f(R_e)$.

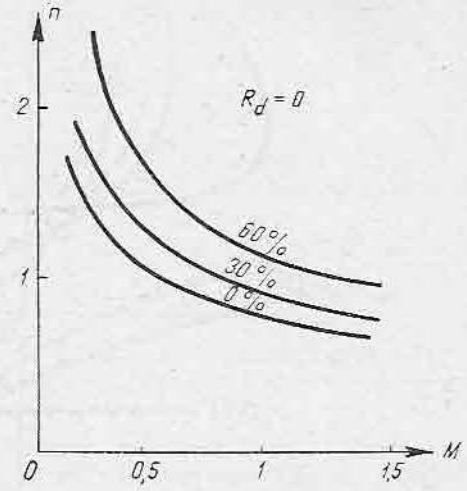


Fig. 12.45. Caracteristici artificiale obținute prin șuntarea înfășurării de excitație.

în cadranul *IV*; t.e.m. devine mai mare decît tensiunea de alimentare și curentul se inversează în indus.

Pentru dimensionarea reostatelor R_e, R_d se trasează familii de caracteristici $n = f(R_e)$ pentru valori stabilite $R = R_e + R_d$ (fig. 12.44). Cunoscînd viteza și rezistența reostatului R_e, se determină rezistența reostatului R_d.

c. Reglarea turației prin șuntarea înfășurării de excitație

Reglarea turației este în acest caz monozonală, și anume deasupra turației de mers în gol.

Șuntarea înfășurării de excitație micșorează fluxul, ceea ce conduce la creșterea turației.

Pentru o rezistență de șuntare stabilită se determină curentul din indus I_a, curentul prin înfășurarea de excitație (mai mic decît I_a), fluxul Φ, t.e.m. E, turația n și cuplul M. În figura 12.45 este reprezentată o familie de caracteristici, pentru șuntare 0%, 30% și 60% (de exemplu prin șuntare 60% se înțelege derivarea prin rezistența în paralel, a unui curent reprezentînd 0,6 din curentul indusului).

Reglarea vitezei prin șuntarea înfășurării de excitație este folosită în tracțiunea electrică.

D. MOTORUL DE C.C. CU EXCITAȚIE MIXTĂ

1. DATE PRINCIPALE

Pe polii magnetici sînt bobinate două înfășurări care se conectează astfel: *S* în serie și *D* în derivație cu indusul (fig. 12.46).

Înfășurările de excitație pot avea un efect adițional sau diferențial în producerea fluxului motorului.

Motorul cu excitație mixtă se întîlnește și sub denumirea de *motor compound*.

2. CARACTERISTICA NATURALĂ ȘI CARACTERISTICILE ARTIFICIALE ALE MOTORULUI DE CURENT CONTINUU CU EXCITAȚIE MIXTĂ

Caracteristica naturală a motorului compound (fig. 12.47) este rezultatul caracteristicilor motoarelor serie și derivație; o alură de *hiperbolă prelungită pe ramura abscisei cu o dreaptă.*

Caracteristica naturală prezintă următoarele *proprietăți:*

— este mai rigidă decît o caracteristică de motor serie de aceeași putere;

— este mai suplă decît o caracteristică de motor derivație de aceeași putere;

— are o turație limitată de mers în gol n_0;

— căderea de turație Δn este de cel mult 40% între 0 și M_n și de cel mult 15% între M_n și $2M_n$.

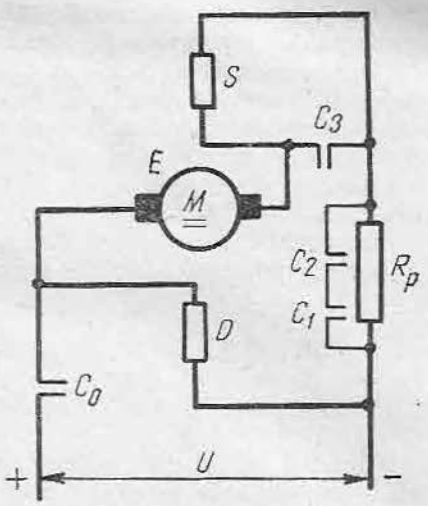


Fig. 12.46. Schema motorului de c.c. cu excitație mixtă (compound).

Datorită acestor proprietăți, motorul compound are următoarele *avantaje:*

— asigură o schemă de pornire cu număr redus de trepte de rezistență;

— poate fi folosit în funcție de diagrama de sarcină numai ca motor serie sau numai ca motor derivație;

— poate funcționa în regim de frînare recuperativă.

Motorul compound este folosit în acționările electrice cu regimuri de funcționare cu șocuri de sarcină.

3. PORNIREA ȘI FRÎNAREA MOTORULUI DE CURENT CONTINUU CU EXCITAȚIE MIXTĂ

În schema motorului de c.c. cu excitație mixtă (v. fig. 12.46) sînt reprezentate și contactoarele de pornire C_0, C_1, C_2, C_3.

Pornirea începe pe caracteristica naturală *1*, prin anclanșarea contactorului C_0 (fig. 12.48).

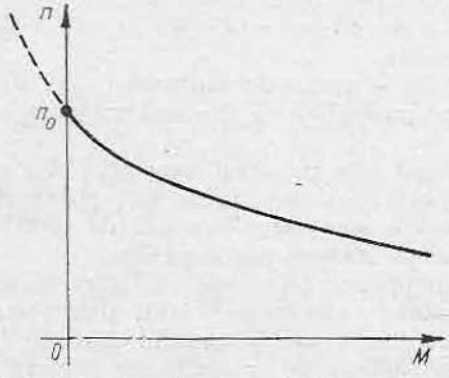


Fig. 12.47. Caracteristica naturală a unui motor compound.

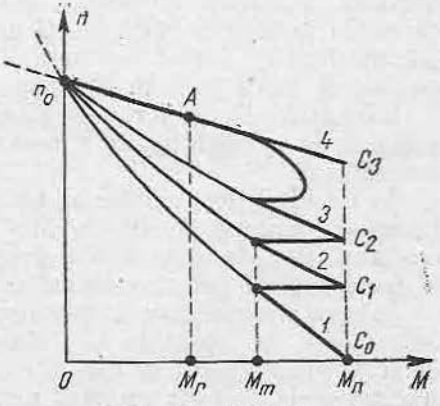


Fig. 12.48. Caracteristicile de pornire ale motorului compound.

Două caracteristici artificiale *2*, *3* se obțin scurtcircuitînd treptele de rezistență ale reostatului de pornire R_p prin anclanșarea contactoarelor C_1, C_2.

Prin anclanșarea contactorului C_3, înfășurarea serie este scurtcircuitată și motorul devine derivație. Funcționarea se face pe caracteristica *4*. Se observă porțiunea curbă a caracteristicii de pornire între caracteristicile *3* și *4*, care se datorește efectului de amortizare al înfășurării serie.

Motorul compound poate fi frînat recuperativ, prin contraconectare și dinamic.

La frînare, se suntează înfășurarea serie, pentru ca funcționarea să fie stabilă; astfel, caracteristicile opririi sînt aceleași ca pentru motorul derivație.

E. GRUPUL GENERATOR-MOTOR DE CURENT CONTINUU

1. NOȚIUNI GENERALE

Motorul de curent continuu poate fi alimentat de la o rețea de curent continuu, de la un generator propriu, sau de la o instalație de redresare proprie. În cazul alimentării de la o rețea de curent continuu, practic rar utilizată, comanda motorului se face în modul și în limitele arătate în paragrafele precedente ale prezentului capitol.

Acționările cu puteri mari, cu frecvență mare de pornire și reversări rapide, cu gamă mare de reglare a turației, au impus însă crearea unor sisteme de alimentare și comandă cu caracteristici mult îmbunătățite. Grupul generator-motor, caracterizat prin alimentarea motorului de la un generator propriu, a fost un prim pas în această direcție. Întrucît grupul generator-motor, cunoscut și sub denumirea de grup Ward-Leonard, este utilizat destul de mult și în prezent, în cele ce urmează se vor studia principalele lui caracteristici și avantaje.

Alimentarea motorului de la o instalație de redresare statică, proprie, cu comandă pe grilă, este cea mai modernă și mai avantajoasă și va fi tratată în capitolul 16.

● **Grupul generator-motor.** Revenind la grupul generator-motor prezentat în figura 12.49, se observă că motorul asincron *MA*, alimentat de la rețeaua trifazată de curent alternativ, antrenează generatorul de curent continuu cu excitație independentă *G*. Generatorul alimentează direct de la bornele sale motorul de curent continuu cu excitație independentă *M*, iar *ML* este mașina de lucru pusă în funcțiune de motor.

Excitațiile Ex_G și Ex_M ale generatorului și respectiv motorului sînt alimentate de la excitatoarea *E* montată pe același ax cu motorul asincron și generatorul.

În circuitul de excitație al generatorului este prevăzut reostatul R_{eG} și inversorul manual *K*. În circuitul de excitație al motorului este prevăzut reostatul R_{eM}. Inversorul *K* servește pentru inversarea sensului de rotație al motorului *M* prin inversarea tensiunii la bornele generatorului.

În cazul grupului generator-motor de putere mare, reprezentat în figura 12.50, înfășurările de excitație ale generatorului și motorului sînt alimentate de la un grup separat de mașini excitatoare, antrenat de motorul asincron *1*. Excitatoarele *3*, *4* alimentează direct înfășurările de excitație ale generatorului și motorului. Elementele de comandă (reostatele R_1, R_2 și inversorul *I*)

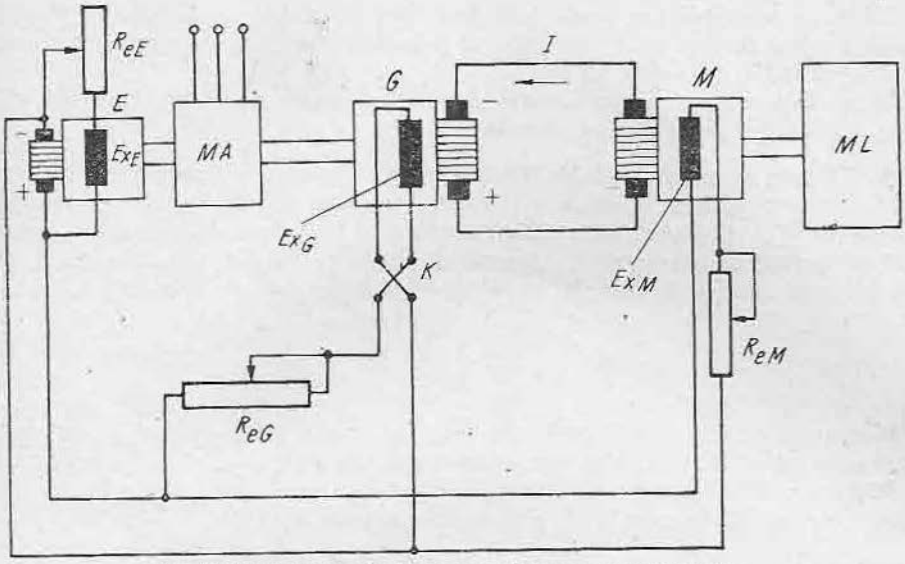


Fig. 12.49. Schema electrică a unui grup generator-motor.

sînt legate în circuitele de excitație ale excitatoarelor, în care circulă curenți mai mici. Generatorul 2 cu excitație derivație alimentează înfășurările de excitație ale excitatoarelor.

2. PORNIREA ȘI VARIEREA VITEZEI DE ROTAȚIE

● **Gama de reglaj a turației.** Cu referire la figura 12.49, se observă că reostatul R_{eG} este folosit pentru reglarea între zero și valoarea nominală a tensiunii la bornele generatorului, prin varierea fluxului inductor, presupunînd bineînțeles că motorul asincron *MA* se rotește la turația sa nominală. Totuși, *datorită pierderilor de tensiune în indusurile generatorului și motorului, varierea vitezei motorului M nu se poate face între zero și valoarea nominală.*

Căderile de tensiune din indusurile motorului și generatorului reprezintă circa 8% din tensiunea la bornele generatorului:

$$\Delta U = 0{,}08\ U_G.$$

Raportul între turația nominală n_n *și turația minimă* n_{min} *posibil de obținut* este egal cu raportul tensiunilor corespunzătoare:

$$\frac{n_n}{n_{min}} = \frac{U_G - \Delta U}{\Delta U} =$$

$$= \frac{U_G - 0{,}08U_G}{0{,}08\ U_G} =$$

$$= 11{,}5 \approx 10 \ldots 12.$$

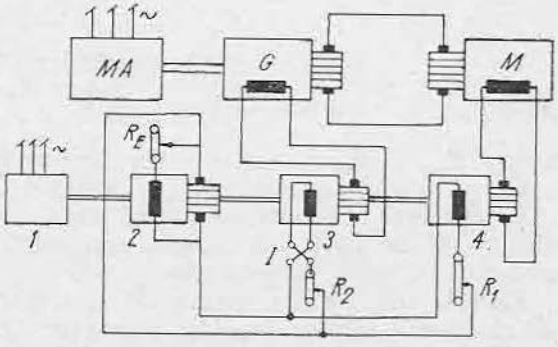


Fig. 12.50. Schema electrică a unui grup generator-motor de putere mare.

Pornirea motorului se poate face deci fără rezistențe de pornire, acționînd numai asupra curentului de excitație al generatorului, care este mic și necesită aparataj simplu și ieftin.

În același mod se asigură varierea turației motorului între limitele n_{min} și n_n, al căror raport a fost stabilit anterior.

● **Mărirea gamei de reglaj a turației.** Gama de variere („reglaj") a turației poate fi mărită și mai mult prin slăbirea cîmpului motorului M cu *ajutorul reostatului* R_{eM}. În cazul alimentării motorului la tensiunea nominală (generatorul excitat la maximum), turația sa poate fi mărită de circa 2 ...3 ori prin *slăbirea cîmpului* pînă la o valoare corespunzătoare turației n_M:

$$\frac{n_M}{n_n} = 2 \dots 3.$$

Motoarele utilizate în acest caz sînt de construcție specială pentru a rezista din punct de vedere mecanic la turații mai mari decît turația nominală.

Raportul între turația maximă n_M obținută prin slăbirea cîmpului la tensiune de alimentare nominală și *turația minimă* n_n este:

$$\frac{n_M}{n_{min}} = \frac{n_M}{n_n} \cdot \frac{n_n}{n_{min}} = 30 \dots 40.$$

Concluzie. Domeniul de reglare al vitezelor este deci foarte larg la grupul generator-motor și el poate fi încă mărit prin adoptarea unor măsuri constructive corespunzătoare în privința acelor factori care limitează valoarea minimă stabilă a turației (n_{min}).

3. FRÎNAREA ȘI REVERSAREA

Frînarea se face *prin deconectarea înfășurării de excitație a generatorului* Ex_G *de la sursa de alimentare și conectarea ei pe o rezistență de frînare.*

În această situație, tensiunea electromotoare a motorului devine mai mare decît tensiunea electromotoare a generatorului, $E_M > E_G$ și rolurile se schimbă: motorul devine generator, iar generatorul motor.

Curentul în circuitul principal schimbă de sens și ia valoarea:

$$\boxed{I_f = \frac{E_M - E_G}{R_{aM} + R_{aG}}},$$

în care R_{aM} și R_{aG} sînt rezistențele indusurilor.

Curentul în înfășurarea Ex_G își schimbă de asemenea sensul și scade.

Generatorul G lucrînd ca motor cu flux diminuat, antrenează motorul asincron M la valori ale turației mai mari decît valoarea de sincronism, trecîndu-l în regim de generator.

Energia cinetică a motorului M și a mașinii de lucru ML scad repede, realizîndu-se o frînare completă, care poate fi urmată de inversarea sensului de rotație, prin comutarea inversorului K pe poziția în care înfășurarea Ex_G este alimentată din nou de la excitatoare, dar cu polaritate inversată.

4. CARACTERISTICI MECANICE

Caracteristica mecanică a grupului *G-M* se obține pornind de la ecuația echilibrului tensiunilor electromotoare:

$$E_G = E_M + R_{aG}I + R_{aM}I,$$

în care I este curentul din circuitul principal, E_G și E_M tensiunile electromotoare ale generatorului și motorului, iar R_{aG} și R_{aM} — rezistențele indusurilor generatorului și motorului.

Se știe că în cazul motorului derivație de curent continuu

$$E_M = C_{eM}n\Phi_M,$$

deci se poate scrie:

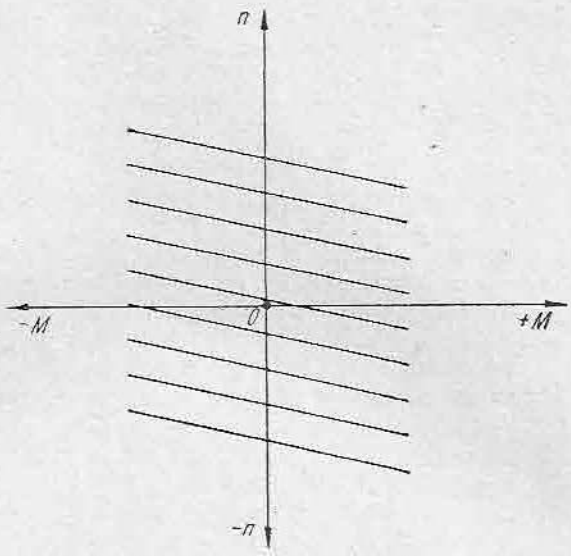


Fig. 12.51. Caracteristicile mecanice ale grupului G.M.

$$E_G = C_{eM}n\Phi_M + (R_{aG} + R_{aM})\,I$$

$$n = \frac{E_G}{C_{eM}\Phi_M} - \frac{R_{aG} \pm R_{aM}}{C_{eM}\Phi_M}\,I = n_0 - \Delta n,$$

în care: n_0 este viteza de mers în gol;

Δn — căderea de turație proporțională cu curentul I.

Folosind relația cunoscută $M = C_{mM}\Phi_M I$, se ajunge la relația:

$$\boxed{n = n_0 - \frac{R_{aM} + R_{aG}}{C_{eM}C_{mM}\Phi_M^2} \cdot M}$$

Conform relației de mai sus, *caracteristicile mecanice ale motorului grupului G — M sînt reprezentate printr-o familie de drepte paralele, înclinate față de axa absciselor* (fig. 12.51).

F. MOTORUL ASINCRON TRIFAZAT

1. CARACTERISTICA MECANICĂ NATURALĂ

Expresia simplificată a caracteristicii mecanice naturale a motorului asincron este:

$$M = \frac{2M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}$$

$$M_k = K_1 \frac{U^2}{f_1^2} \quad \text{(momentul maxim-critic)}$$

$$s_k = K_2 \frac{R_2}{f_1} \quad \text{(alunecarea critică)}$$

$$s = \frac{n_0 - n}{n} \quad \text{(alunecarea)}$$

în care: K_1, K_2 sînt constante ale motorului respectiv;
U este tensiunea de alimentare a statorului pe fază;
f_1 — frecvența tensiunii de alimentare;
R_2 — rezistența înfășurării rotorice;
n_0 — turația de sincronism;
n — turația motorului.

Pe baza acestor relații se poate trece la reprezentarea grafică (fig. 12.52) a curbelor $M = f(s)$ și $n = f(M)$.

Întrucît turația și alunecarea sînt două mărimi inverse $n = n_0(1 - s)$, cele două caracteristici au aceeași alură.

Ramurile $OB'C'$ ale caracteristicilor corespund funcționării în regim de generator și nu fac obiectul de studiu al acestui capitol.

Pe ramurile $OABC$ ale caracteristicilor, corespunzătoare funcționării în regim de motor, se observă următoarele puncte importante:

— punctul 0, în care $s = 0$, $n = n_0$, $M = 0$ (rotorul are aceeași turație cu cîmpul învîrtitor și în rotor nu se induc tensiuni, deci nu apare cuplu);

— punctul A, în care $s = s_n$, $n = n_n$, $M = M_n$ (motorul funcționează la turație nominală și cuplu nominal);

— punctul B, în care $s = s_k$, $n = n_k$, $M = M_k$ (alunecării critice îi corespunde turația critică și cuplul critic);

— punctul C, în care $s = 1$, $n = 0$, $M = M_p$ (în momentul inițial al pornirii turația este zero, iar motorul dezvoltă un cuplu de pornire M_p).

Dacă cuplul rezistent la pornire M_{rp}, care nu este reprezentat în figură, este mai mic decît cuplul de pornire al motorului M_p, atunci motorul poate fi pornit prin alimentarea cu tensiune a statorului, astfel:

— în momentul inițial al pornirii motorul dezvoltă un cuplu $M_p > M_{rp}$;

— motorul pornește și accelerează, turația crește, deci alunecarea scade și punctul de funcționare al motorului se deplasează din C către B;

— după atingerea valorilor critice în punctul B, cuplul dezvoltat de motor începe să scadă, dar motorul accelerează în continuare (punctul de funcționare se deplasează din B către A);

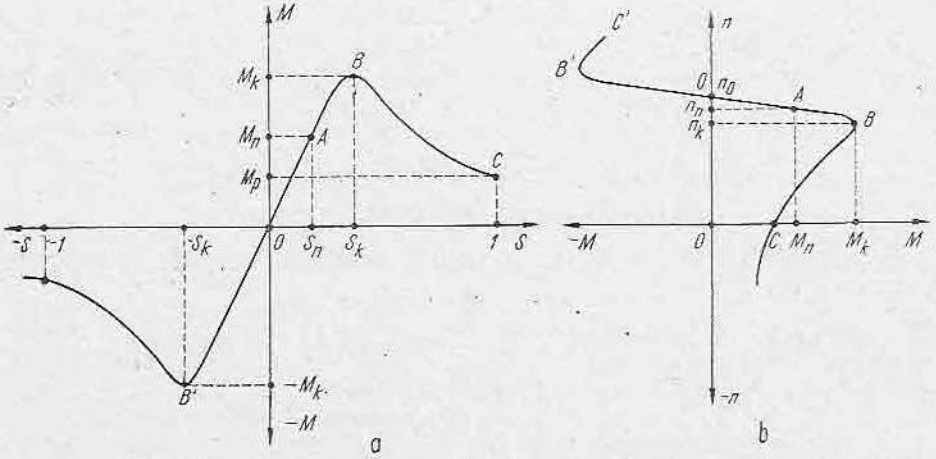


Fig. 12.52. Caracteristicile mecanice ale motorului asincron trifazat:
a — $M = f(s)$; b — $n = f(M)$.

— în punctul A motorul funcționează la turație și cuplu nominal, dacă cuplul rezistent corespunde cuplului nominal al motorului; în majoritatea cazurilor cuplul rezistent este variabil, luînd valori mai mari sau mai mici decît cuplul nominal, deci punctul de funcționare al motorului se deplasează în jurul punctului de funcționare nominală A (deasupra sau dedesubtul acestuia).

Dacă cuplul rezistent M_r variază în limite mici (datorită frecărilor neuniforme în mecanism etc.), alunecarea variază de asemenea cu valori mici, scăzînd dacă a scăzut M_r sau crescînd dacă a crescut M_r. Rezultă că mașina asigură o funcționare stabilă la variațiile mici ale cuplului rezistent. Aceasta se întîmplă bineînțeles numai pe porțiunea ascendentă OB a curbei $M = f(s)$ pe care se găsește punctul de funcționare, cealaltă porțiune fiind nestabilă. Într-adevăr, se observă că o creștere a lui M_r pe porțiunea BC (fig. 12.52) peste valoarea M_k duce la scăderea cuplului M și alunecarea motorului crește pînă la oprirea completă.

Dacă motorul funcționează normal pe porțiunea stabilă a caracteristicii și la un moment dat cuplul rezistent își schimbă sensul, devenind negativ, rotorul este rotit cu o viteză din ce în ce mai mare și alunecarea scade. Motorul trece prin punctul O în care $s = 0$, $M = 0$, alunecarea începe să devină negativă, cuplul M devine de asemenea negativ și mașina începe să lucreze în regim de generator.

Observații. Asupra valorilor M_p și M_k ale cuplului, care depind de caracteristicile constructive ale motorului și sînt date în cataloagele uzinelor producătoare, trebuie să se facă următoarele remarci:

— valoarea cuplului rezistent la pornire M_{rp} trebuie să fie inferioară cuplului motor la pornire $M_p (M_{rp} < M_p)$, deoarece în caz contrar motorul nu poate porni (rotor calat) și înfășurările sînt parcurse de un curent foarte mare;

— valoarea cuplului rezistent M_r în timpul funcționării trebuie să fie inferioară cuplului critic ($M_r < M_k$), deoarece depășirea valorii M_k duce la trecerea punctului de funcționare pe porțiunea nestabilă, motorul se oprește și înfășurările sale sînt parcurse de curenți foarte mari;

— cuplul critic M_k (denumit și cuplul de răsturnare) are totdeauna valori mai mari decît cuplul nominal, tocmai pentru a evita depășirea accidentală a acestei valori. Practic, acesta are valoarea:

$$M_k = (1{,}5 \ldots 4)\, M_n;$$

— cuplul de pornire M_p poate avea valori mai mici sau mai mari decît cuplul nominal, deoarece există mecanisme la care cuplul rezistent la pornire este mai mic și mecanisme la care acest cuplu este foarte mare.

2. CARACTERISTICI MECANICE ARTIFICIALE

Din expresiile simplificate ale cuplului, alunecării critice și cuplului critic se observă că factorii care pot fi modificați pentru a obține variația cuplului M sînt:

— rezistența rotorului R_2;

— tensiunea de alimentare U;

— frecvența tensiunii de alimentare f_1.

Caracteristica naturală a unui motor poate fi transformată în familii de caracteristici artificiale corespunzătoare diferitelor valori ale celor trei factori arătați mai sus.

a. Caracteristici mecanice artificiale obținute prin modificarea rezistențelor din circuitul rotoric

Modul cum variază caracteristica mecanică prin introducerea unor rezistențe suplimentare în circuitul rotoric al motoarelor asincrone cu rotor bobinat, rezultă din relația:

$$s_k = \frac{K_2 R_2}{f_1}.$$

Dacă se introduce în circuit o rezistență exterioară R_{2e};

$$s_{ke} = \frac{K_2(R_2 + R_{2e})}{f_1},$$

$$\frac{s_k}{s_{ke}} = \frac{R_2}{R_2 + R_{2e}}$$

$$s_{ke} = \frac{R_2 + R_{2e}}{R_2} s_k.$$

Rezultă că *alunecarea critică crește odată cu creșterea rezistenței rotorice*, raportul rezistențelor din expresia de mai sus fiind supraunitar și cu atît mai mare cu cît R_{2e} este mai mare.

Cuplul critic M_k nu se modifică prin introducerea rezistenței exterioare.

Familia de caracteristici $M = f(s)$ și $n = f(M)$ este reprezentată în figura 12.53.

Porțiunea dreaptă a caracteristicii se înclină din ce în ce mai mult, pe măsură ce crește rezistența introdusă în circuitul rotoric: $R_2 < R_{21} < R_{22} < R_{23}$.

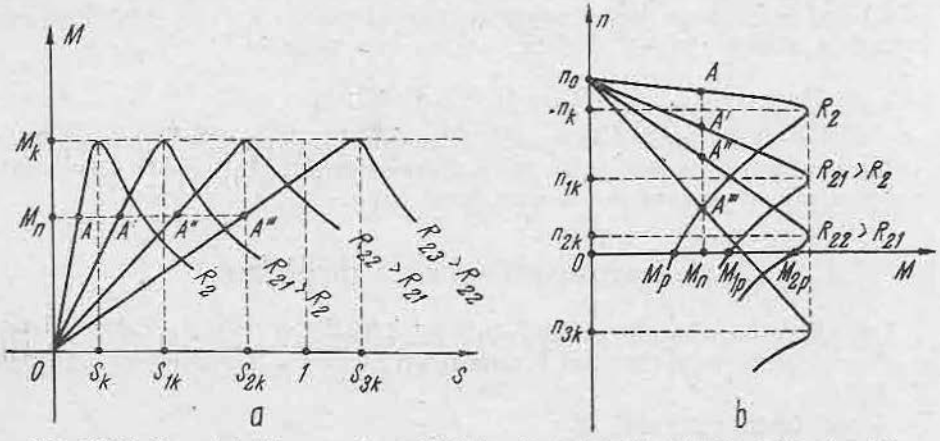


Fig. 12.53. Caracteristici mecanice artificiale ale motorului asincron trifazat, obținute prin variația rezistenței din circuitul rotoric:
$a - M = f(s)$; $b - n = f(M)$.

Se observă că pentru punctul de funcționare corespunzător cuplului nominal M_n, pe fiecare caracteristică se obține o altă alunecare, deci o altă turație (punctele A, A', A'', A'''). Rezultă posibilitatea modificării turației prin introducerea de rezistențe în circuitul rotoric, dar gama de variație a vitezei este limitată de faptul că la alunecări mari scade foarte mult stabilitatea funcționării motorului. Într-adevăr, în punctul A''', la variații mici ale cuplului rezistent în jurul valorii nominale M_n, apar variații mari ale alunecării s.

Pe măsură ce rezistența introdusă în circuitul rotoric crește, crește de asemenea și cuplul de pornire M_p (fig. 12.53, *b*).

Rezultă posibilitatea măririi cuplului de pornire prin introducerea rezistențelor, ceea ce este de foarte mare importanță în acționările în care se cere cuplu de pornire mare.

Observații:

— modificarea caracteristicii mecanice prin introducerea de rezistențe în circuitul rotoric poate fi utilizată numai în cazul motoarelor asincrone cu rotor bobinat;

— cuplul de pornire se mărește prin introducerea de rezistențe numai pînă la acea rezistență căreia îi corespunde $s_k = 1$, după care se micșorează (în figura 12.53, *b* se observă că $M_{3p} < M_{2p}$).

b. Caracteristici mecanice artificiale obținute prin varierea tensiunii de alimentare

Modificarea caracteristicii mecanice se face practic prin scăderea tensiunii de alimentare și rezultă din relațiile:

$$M_K = K_1 \frac{U^2}{f_1^2}; \quad M_{Kn} = K_1 \frac{U_n^2}{f_1^2}; \quad M_{k1} = K_1 \frac{U_1^2}{f_1^2}; \quad M_{k2} = K_2 \frac{U_2^2}{f_1^2}$$

unde:

$$U_2 < U_1 < U$$

$$s_K = K_2 \frac{R_2}{f_1}.$$

Se observă că cuplul critic scade cu scăderea tensiunii de alimentare, în timp ce alunecarea critică rămîne constantă, reprezentarea grafică a curbelor fiind cea din figura 12.54.

Punctul de funcționare corespunzător cuplului nominal M_n corespunde unor alunecări, deci unor turații diferite pe cele trei caracteristici, deci se poate varia viteza prin scăderea tensiunii de alimentare.

Gama de reglaj este mai redusă decît în cazul rezistențelor introduse în circuitul rotoric, deoarece se ajunge repede la pragul de tensiune căreia îi corespunde un cuplu maxim mai mic decît cuplul rezistent și motorul se oprește (alunecarea maximă ce se poate obține este, teoretic, s_k).

Stabilitatea caracteristicilor scade, de asemenea, cu scăderea tensiunii de alimentare.

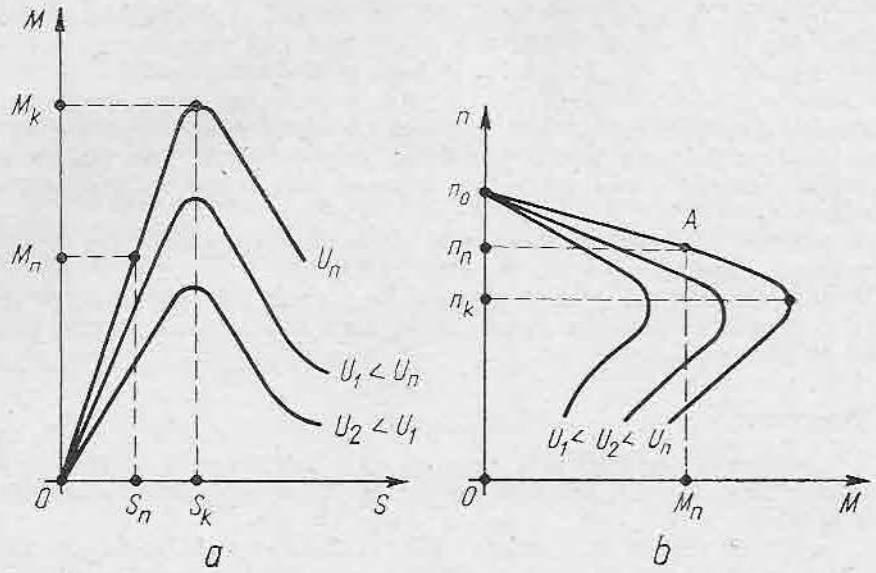


Fig. 12.54. Caracteristici mecanice artificiale ale motorului asincron trifazat, obținute prin variația tensiunii de alimentare:
$a - M = f(s)$; $b - n = f(M)$.

Observații:

— varierea tensiunii de alimentare se poate folosi atît la motoarele asincrone cu rotorul în scurtcircuit, cît și la cele cu rotorul bobinat;

— cuplul de pornire scade în cazul scăderii tensiunii de alimentare, ceea ce constituie o nouă limitare în privința scăderii tensiunii.

c. Caracteristici mecanice artificiale obținute prin variația frecvenței tensiunii de alimentare

Dacă se iau în considerație relațiile:

$$s_k = K_2 \frac{R_2}{f_1},$$

$$M_k = K_1 \frac{U^2}{f_1^2},$$

se observă că atît alunecarea critică, cît și cuplul critic cresc cînd scade frecvența și scad cînd aceasta se mărește, deosebirea fiind că alunecarea este invers proporțională cu frecvența, iar cuplul critic — cu frecvența la pătrat.

În același timp, din relația cunoscută:

$$n_0 = \frac{60 f_1}{p_1},$$

în care p_1 este numărul de perechi de poli, se observă că turația din sincronism este direct proporțională cu frecvența.

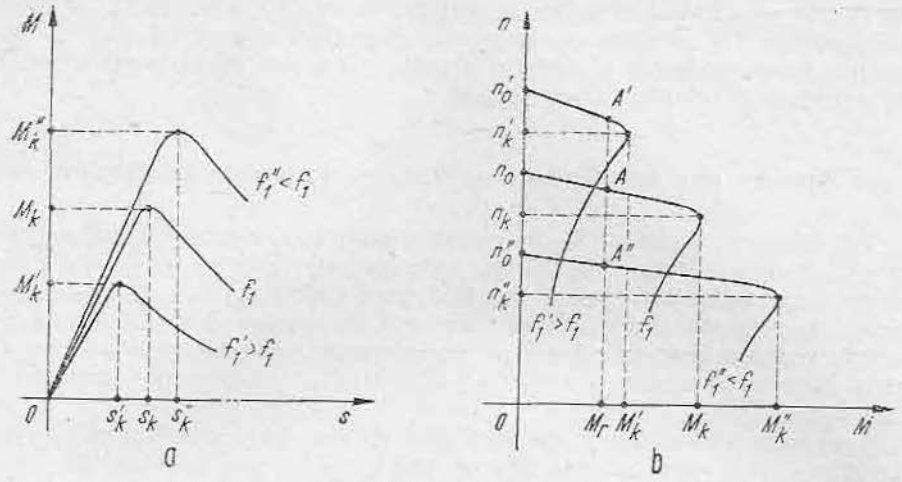


Fig. 12.55. Caracteristici mecanice artificiale ale motorului asincron trifazat, obținute prin variația frecvenței tensiunii de alimentare:
$a - M = f(s)$; $b - n = f(M)$.

Caracteristicile $M = f(s)$ din figura 12.55, *a* nu pot da în acest caz o imagine reală a situației; alunecările de pe fiecare curbă corespund unor turații de sincronism diferite. Variația de viteză este mult mai mare decît ar reieși din variația alunecării pe diferite caracteristici $M = f(s)$ și se pot aprecia exact curbele $n = f(M)$ din figura 12.55, *b*.

Astfel, dacă frecvența f_1 este frecvența nominală, prin scăderea ei la valoarea $f_1'' > f_1$, cuplul maxim crește la valoarea $M_k'' > M_k$ și turația de sincronism scade la valoarea $n_0'' < n_0$. Invers, cînd $f_1' > f_1$, $M_k' < M_k$ și $n_0' > n_0$.

Variația frecvenței se poate face în ambele domenii, prin alimentarea motorului de la un convertizor de frecvență, *caracteristicile menținîndu-și rigiditatea și funcționarea mașinii fiind la fel de stabilă pe oricare din caracteristici.*

Desigur, că în cazul măririi frecvenței, reglajul este limitat de valorile minime ale cuplului maxim și ale cuplului de pornire, iar în cazul micșorării frecvenței — de valorile maxime ale acestor cupluri. Într-adevăr, creșterea peste o anumită limită a acestor cupluri pune probleme privind realizarea unor porniri line, fără șocuri mecanice.

3. PORNIREA MOTORULUI ASINCRON

Cuplul motor trebuie să fie capabil să învingă în timpul pornirii atît cuplul rezistent, cît și cuplul dinamic rezultat din inerția mecanică a maselor învîrtitoare ale sistemului motor-mașină de lucru.

Ca rezultat al acestei inerții a sistemului *apare un regim tranzitoriu,* care va fi studiat în capitolul 13 și care are ca rezultat apariția unor curenți de pornire în stator și rotor mult mai mari (de circa 6—7 ori) decît curenții nominali.

Pentru prevenirea şocurilor de curent în reţea, a încălzirii exagerate a înfăşurărilor şi a şocurilor mecanice din timpul pornirii, se foloseşte fie introducerea rezistenţelor de pornire în circuitul rotorului, fie micşorarea tensiunii de alimentare a înfăşurărilor statorice.

a. Pornirea prin introducerea rezistenţelor de pornire în circuitul rotoric

Introducerea rezistenţelor în circuitul rotoric al motoarelor asincrone cu rotorul bobinat permite obţinerea unor caracteristici cu cuplu de pornire mare şi un regim tranzitoriu lin, fără şocuri electrice sau mecanice. După terminarea regimului tranzitoriu rezistenţa de pornire se scoate din circuitul rotoric şi motorul funcţionează pe caracteristica naturală care asigură atingerea turaţiei nominale şi stabilitatea turaţiei la modificările cuplului rezistent.

Scoaterea rezistenţei de pornire din circuit după terminarea regimului tranzitoriu se impune şi datorită consumului important şi nedorit de energie în această rezistenţă.

Pentru realizarea unei porniri de o calitate cît mai bună, se utilizează mai multe trepte pentru rezistenţa trifazată de pornire, în general între 3 şi 6 trepte, numărul acestora fiind dictat atît de necesitatea de a obţine performanţe superioare din punct de vedere al regimului tranzitoriu de pornire, cît şi de eficienţa economică a instalaţiei în ansamblu, ţinînd cont de costul ridicat al unei rezistenţe cu număr mare de trepte, al conexiunilor şi aparaturii de comandă aferente.

● **Metoda grafică de determinare a treptelor de rezistenţă** este destul de simplă şi în acelaşi timp cea mai intuitivă în privinţa fenomenelor fizice care au loc în timpul pornirii.

În figura 12.56, *a* este prezentată schema de legare a rezistenţei de pornire trifazate în circuitul rotorului, a cărui rezistenţă pe fază este R_a. Rezistenţa de pornire are, într-un caz general, m trepte (concret, s-a considerat $m = 3$) ale căror valori sînt $r_1, r_2, \ldots r_m$. Rezistenţa totală înseriată în circuitul indusului are valorile:

$$R_1 = r_1 + r_2 + \ldots + r_{m-1} + R_a$$
$$R_2 = r_2 + \ldots + r_{m-1} + R_a$$
$$\vdots$$
$$R_{m-1} = r_{m-1} + R_a$$
$$R_m = R_a$$

În figura 12.56, *b* sînt reprezentate grafic caracteristicile $M = f(s)$, iar în figura 12.56, *c* caracteristicile $n = f(M)$. Determinarea valorilor treptelor de rezistenţă se va urmări pe caracteristicile $M = f(s)$, fiind similară şi pe caracteristicile $n = f(M)$.

Se trasează caracteristica mecanică naturală OA_1A (conform precizărilor făcute la paragraful privind caracteristica mecanică naturală) şi dreptele corespunzătoare cuplurilor M_m, M_M şi M_n. Cuplul M_n determină pe caracteristica naturală punctul de funcţionare nominal cu alunecarea s_n. Prin punctele A şi A_1, corespunzătoare cuplurilor M_M şi M_n, se duce o dreaptă

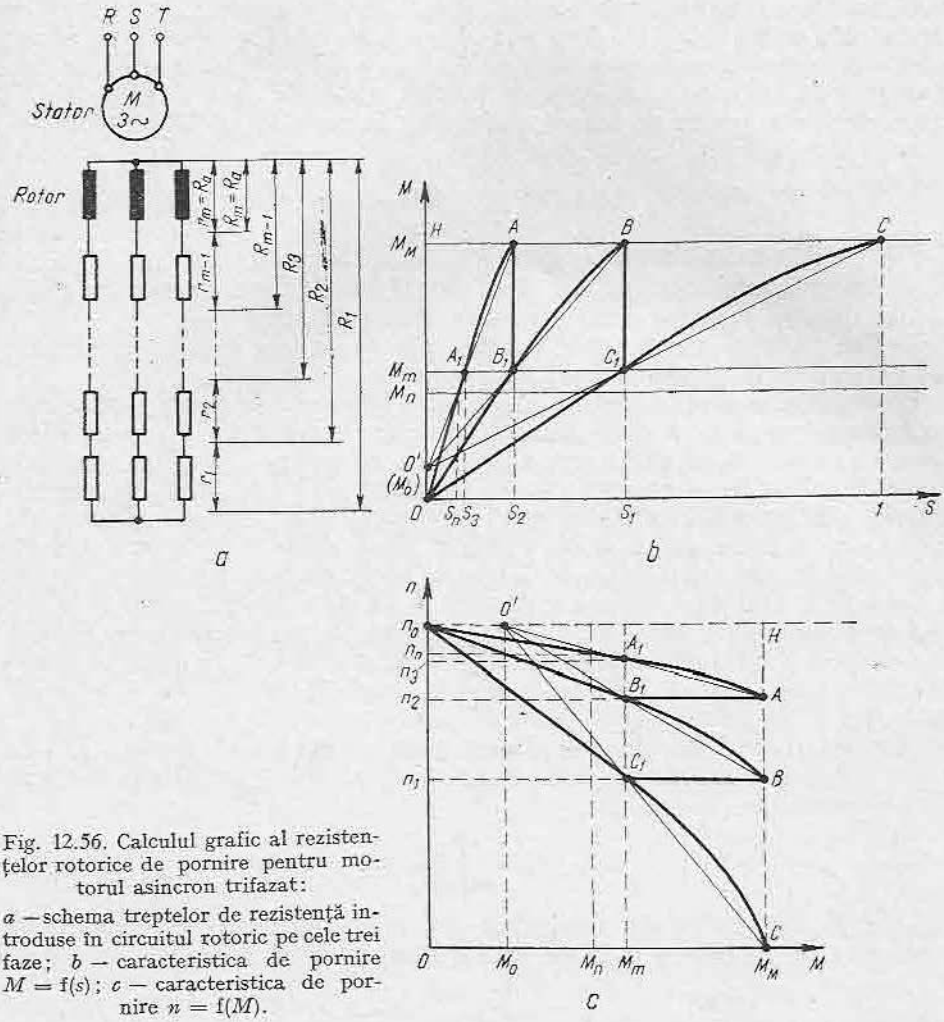


Fig. 12.56. Calculul grafic al rezistențelor rotorice de pornire pentru motorul asincron trifazat:

a — schema treptelor de rezistență introduse în circuitul rotoric pe cele trei faze; *b* — caracteristica de pornire $M = f(s)$; *c* — caracteristica de pornire $n = f(M)$.

care intersectează axa cuplurilor în punctul O'. Se poate demonstra că punctul O' (avînd coordonatele $M = M_0$, $s = 0$) este punctul de concurență al tuturor dreptelor determinate de intersecțiile caracteristicilor artificiale cu dreptele $M = M_m$ și $M = M_M$. Din punctul O' se duce deci dreapta $O'C$ care intersectează dreapta M_m în punctul C_1. Caracteristica artificială care pleacă din punctul O intersectează dreptele M_M și M_m în punctele C și C_1 corespondente rezistenței maxime introduse în circuitul rotoric R_1. Din punctul C_1 se ridică un segment perpendicular pe dreapta M_m, care întîlnește dreapta M_M în punctul B. Dacă prin punctele B și O' se duce o nouă dreaptă, se obține punctul B_1. Caracteristica artificială care trece prin punctele OB_1B corespunde rezistenței R_2 incluse în circuitul rotoric (porțiunea r_1 este scurt-circuitată). Din punctul B_1 se ridică segmentul perpendicular pe dreapta M_m și acesta trebuie neapărat să intersecteze dreapta M_M în punctul A

stabilit anterior, pentru ca pornirea să se facă în bune condiții, respectîndu-se limitele M_M și M_m alese. Dacă nu se realizează această corespondență, atunci trebuie să se modifice limitele M_M și M_m în așa fel încît construcția grafică să se închidă în punctul A. Este de la sine înțeles că dacă se alege un alt număr de trepte pentru rezistența de pornire, limitele M_M și M_m se modifică, distanța între ele fiind cu atît mai mică, cu cît numărul de trepte este mai mare.

Observații:

— Alegerea cuplurilor maxim și minim M_M și M_m se face conform explicațiilor date la pornirea motorului de curent continuu.

— Determinarea treptelor de rezistență se poate face și prin alte metode mai perfecționate (grafo-analitică sau analitică).

Pe construcția grafică (fig. 12.56, *b*) astfel întocmită, se poate explica ușor mecanismul pornirii. Astfel, motorul pornește în punctul C, la alunecarea $s = 1$ și cuplul M_M și alunecarea și cuplul scad pe caracteristica artificială corespunzătoare rezistenței R_1 pînă la punctul C_1. În punctul C_1 se scurtcircuitează porțiunea de rezistență r_1 și rămîne în circuit numai rezistența R_2. Cuplul crește brusc de la valoarea M_m la M_M, alunecarea corespunzătoare fiind s_1. Se ajunge astfel în punctul B și de acolo, pe caracteristica corespunzătoare rezistenței R_2 se ajunge la punctul B_1, la $M = M_m$ și $s = s_2$. Se scurtcircuitează porțiunea de rezistență r_2 și în circuit rămîne numai rezistența rotorului R_a. Cuplul crește brusc la M_M în punctul A și apoi scade pe caracteristica naturală, pînă cînd se ajunge la punctul stabil de funcționare $M = M_n$, $s = s_n$.

Întrucît alunecările corespunzătoare punctelor A, B, C ($s = s_2$, $s = s_1$, $s = 1$) reprezintă alunecările critice ale caracteristicilor respective, conform relației cunoscute:

$$\frac{s_k}{s_{k1}} = \frac{R_2}{R_2 + R_{2e}}$$

(în care R_2 este rezistența înfășurării rotorice, care în această construcție se va nota cu R_a pentru evitarea confuziilor), se poate scrie:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{1}{s_2} = \frac{\overline{HC}}{\overline{HA}}, \qquad \text{deci} \qquad R_1 = R_a \frac{\overline{HC}}{\overline{HA}},$$

$$\frac{R_2}{R_a} = \frac{s_1}{s_2} = \frac{\overline{HB}}{\overline{HA}}, \qquad \text{deci} \qquad R_2 = R_a \frac{\overline{HB}}{\overline{HA}}$$

sau:

$$r_1 = R_1 - R_2 = \frac{\overline{HC} - \overline{HB}}{\overline{HA}} R_a = \frac{\overline{BC}}{\overline{HA}} R_a;$$

$$r_2 = R_2 - R_a = \frac{\overline{HB} - \overline{HA}}{\overline{HA}} R_a = \frac{\overline{AB}}{\overline{HA}} R_a.$$

Pentru a determina valorile rezistențelor este suficient să se cunoască rezistența R_a pe o fază a înfășurării rotorice și să se măsoare segmentele care intervin în formulele de mai sus.

b. **Pornirea prin reducerea tensiunii de alimentare a înfășurărilor statorice**

● **Pornirea cu comutator stea-triunghi.** Comutatorul stea-triunghi este un comutator cu acționare manuală sau automată, care poate realiza, așa cum se vede în figura 12.57, o pornire în două trepte de tensiune a motorului asincron cu rotorul în scurtcircuit sau a celui cu rotor bobinat.

Într-adevăr, tensiunea aplicată înfășurărilor statorului în cazul conexiunii în stea este de $\sqrt{3}$ ori mai mică decît tensiunea nominală a rețelei între faze, iar în cazul conexiunii în triunghi este egală cu tensiunea nominală a rețelei între faze.

Acest procedeu de pornire este utilizat la motoare mici și mijlocii și este simplu și ieftin.

Caracteristicile de pornire $M_\Delta = f(s)$ și $M_Y = f(s)$ sînt reprezentate în figura 12.57, *b*. Se observă că motorul pornește pe caracteristica $M_Y = f(s)$ și accelerează pînă în momentul comutării pe conexiunea în stea, în punctul A. În acest moment punctul de funcționare al motorului sare brusc din A în A' și motorul continuă să accelereze în continuare pe caracteristica $M_\Delta = f(s)$. Punctul de funcționare se va deplasa din A' către O și se va stabili în funcție de valoarea cuplului rezistent.

Alimentarea motorului cu tensiune scăzută pînă la atingerea punctului A, deci în timpul utilizării conexiunii în stea, are dezavantajele arătate în paragraful anterior și anume: cuplul de pornire și cuplul critic sînt mult mai mici. Întrucît cuplul scade cu pătratul tensiunii aplicate, în cazul conexiunii în stea cuplul de pornire și cuplul critic sînt de 3 ori mai mici decît în cazul conexiunii în triunghi.

Observație. Pentru a se evita orice confuzii, se precizează că toate motoarele asincrone au posibilitatea de a cupla înfășurările în conexiunea stea sau

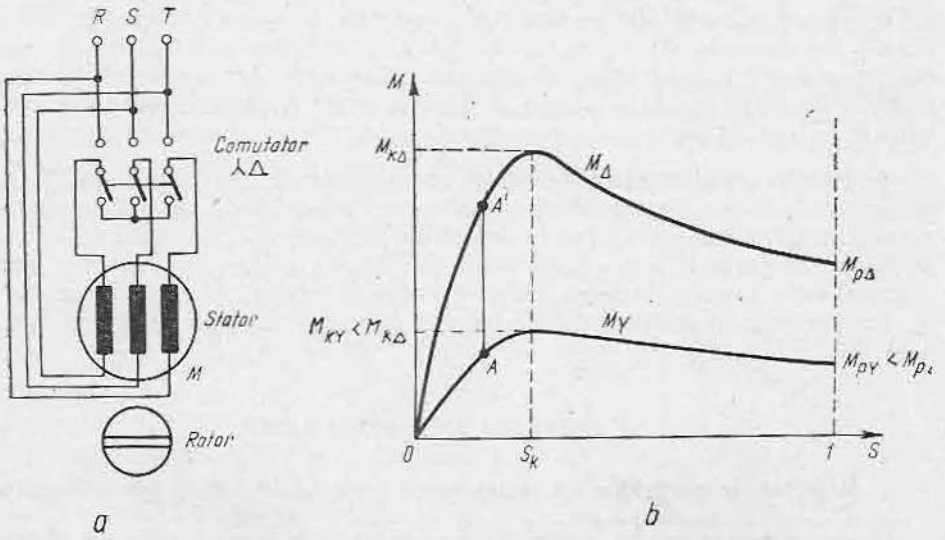


Fig. 12.57. Pornirea cu comutator stea-triunghi a motorului asincron trifazat:
a — schema electrică de pornire; *b* — caracteristicile de pornire.

triunghi, iar pe plăcuțele acestor motoare sînt înscrise tensiunile corespunzătoare funcționării nominale, de exemplu: Δ/Y — 380/660 V.

Motorul dat ca exemplu poate fi utilizat în trei moduri:

— dacă bornele sale sînt astfel legate încît să rezulte conexiunea în triunghi, atunci motorul poate fi alimentat de la o rețea alternativă trifazată cu tensiunea între faze de 380 V;

— în cazul conexiunii în stea, motorul poate fi alimentat de la o rețea alternativă trifazată cu tensiunea între faze de 660 V;

— dacă se utilizează pornirea stea-triunghi, atunci se impune alimentarea motorului de la rețeaua alternativă trifazată cu tensiunea între faze de 380 V.

● **Pornirea cu rezistențe înseriate în circuitul statoric.** În figura 12.58 este prezentată schema electrică a înfășurărilor statorice și a rezistențelor de pornire corespunzătoare. În timpul pornirii, cînd apar curenții de pornire mari, pe rezistențe apare o cădere de tensiune. În felul acesta, înfășurărilor statorice li se aplică tensiuni reduse și curenții de pornire sînt limitați la valori admisibile.

Metoda este aplicabilă atît la motoarele asincrone trifazate cu rotorul în scurtcircuit, cît și la cele cu rotorul bobinat.

La motoarele cu porniri dese, consumul de energie în rezistența trifazată de pornire începe să aibă o oarecare însemnătate și de aceea *metoda se aplică la motoarele cu porniri rare.*

Contactele C_1, C_2, C_3 ale contactorului C se închid pentru pornire, includ zînd rezistențele $R = R_1$, R_2, R_3 în circuitul de alimentare al înfășurărilor statorice. După trecerea unui anumit timp, se comandă închiderea contactelor contactorului L. Rezistențele de pornire R sînt scoase din circuit și motorul este alimentat la tensiunea nominală.

● **Pornirea cu bobine de reactanță înseriate în circuitul statoric** este similară cu pornirea cu rezistențe de pornire. Reactoarele folosite în acest caz au avantajul că se consumă mai puțină energie activă, dar sînt scumpe și înrăutățesc factorul de putere în timpul pornirii. Se folosesc la motoare mari și în special la motoarele sincrone cu pornire în asincron.

● **Pornirea cu autotransformator de alimentare.** În figura 12.59 este prezentată schema de pornire prin reducerea tensiunii de alimentare cu ajutorul autotransformatorului AT. Autotransformatorul este cuplat în schemă la începutul pornirii prin contactorul A și după trecerea unui anumit timp, motorul este conectat la rețea direct prin contactorul C. Autotransformatorul se deconectează și motorul se accelerează și funcționează la tensiunea nominală.

4. FRÎNAREA MOTORULUI ASINCRON

a. Regimul de generator cu recuperarea energiei în rețeaua de alimentare

Regimul de generator cu recuperarea energiei în rețea realizează de fapt o limitare a vitezei de rotație a mecanismului și apare în mod natural în anumite situații, fără a fi necesar să se ia măsuri speciale.

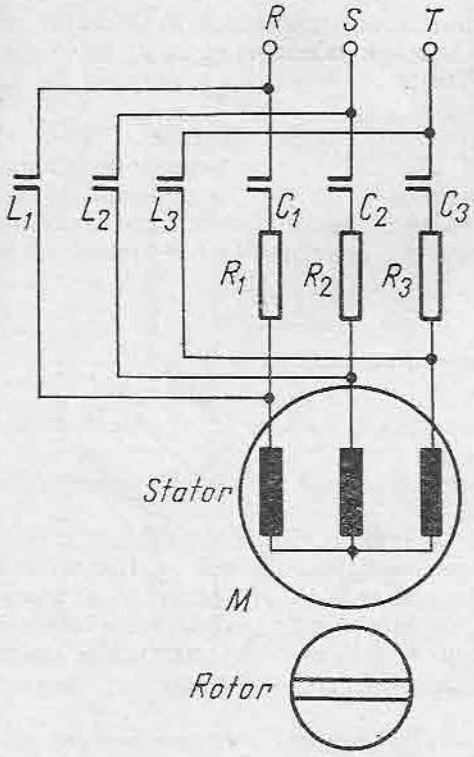


Fig. 12.58. Pornirea cu rezistențe de pornire statorice, a motorului asincron trifazat.

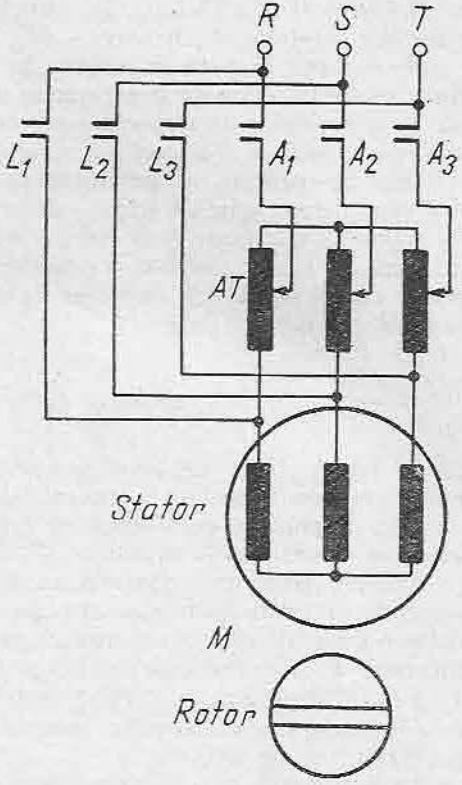


Fig. 12.59. Pornirea cu autotransformator de pornire a motorului asincron trifazat.

Un caz tipic este acela al coborîrii sarcinii la podurile rulante. Motorul lucrează în sensul ridicării în regim nominal de motor, dar imediat ce este comandată coborîrea, trece în regim de generator și limitează viteza de coborîre a sarcinii. Aceasta se întîmplă datorită faptului că sarcina tinde să coboare din ce în ce mai repede și antrenează rotorul motorului la viteze mai mari decît viteza nominală, apoi depășește viteza de sincronism și motorul trece în regim de generator, împiedicînd sarcina să depășească o viteză admisibilă.

În figura 12.60 sînt reprezentate caracteristica naturală (R_a) și caracteristica artificială ($R_1 > R_a$). Se vede că punctul de funcționare în regim de motor A, respectiv A', corespunde cuplului rezistent M_r, cuplul fiind pozitiv. La trecerea în cadranul II cuplul devine negativ

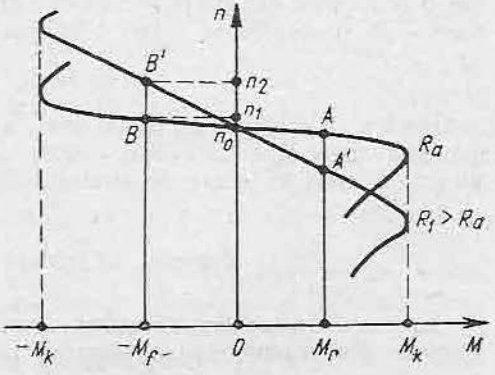


Fig. 12.60. Regimul de frînare cu recuperarea energiei în rețea, al motorului asincron trifazat.

(de frînare) și se stabilește un punct de funcționare B, respectiv B', corespunzător cuplului de frînare $-M_f$.

Se observă că prin includerea în rotor a unei rezistențe R_1, punctul de funcționare în regim de generator se stabilește la o turație $n_2 > n_1$. De aceea, *nu se recomandă introducerea unor rezistențe în circuitul rotoric, care duc la creșterea inutilă (și uneori de nedorit) a vitezei.*

Deși în regimul de generator se realizează numai limitarea vitezei, el este considerat regim de frînare datorită apariției cuplului negativ de frînare.

Regimul de frînare prin recuperarea energiei în rețea este deosebit de important în cazul troliilor, podurilor rulante, mecanismelor care coboară pante etc. și *apare atît la motoarele asincrone cu rotorul în scurtcircuit, cît și la cele cu rotorul bobinat.*

b. Regimul de frînare dinamică

În figura 12.61 este reprezentată schema de frînare dinamică a motorului asincron trifazat cu rotorul bobinat.

Este **important de reținut că** *frînarea dinamică se aplică și motoarelor asincrone cu rotorul în scurtcircuit.*

Motorul asincron se deconectează de la rețeaua de curent alternativ prin deschiderea întrerupătorului tripolar I_1 și două faze ale sale se alimentează de la o sursă de curent continuu care constă, în cazul acesta, dintr-un transformator T_r și un redresor în punte R_d cuplate prin întrerupătoarele bipolare I_2 și I_3. Alimentarea cu curent continuu a înfășurărilor statorice se poate face în patru moduri diferite, arătate în figura 12.61, *c*. Rotorul este conectat pe rezistența de frînare R_2.

În momentul executării acestor operații, motorul — deși a pierdut alimentarea de la rețea — continuă să se rotească datorită energiei cinetice înmagazinate de sistem. Se trece în regim de generator sincron cu inductorul fix care induce în rotor curenți de frecvență variabilă, aceștia închizîndu-se pe rezistența R_2.

În figura 12.61,*b* se dau diferite caracteristici de frînare pentru diferite valori ale rezistenței R_2 ($R_2' > R_2''$, $R_2'' > R_a$, R_a). În momentul în care se comandă frînarea, funcționarea se mută din punctul A (cadranul I), în punctul B (cadranul II) și apare cuplul negativ de frînare — M_f. Cuplului de frînare $-M_f$ îi corespund valori diferite ale vitezei de rotație pe cele trei curbe:

$$n_3 > n_2 > n_1.$$

Pentru ca frînarea să fie cît mai rapidă, este necesar să se includă o asemenea rezistență în circuitul rotoric (R_2''), încît frînarea să înceapă într-un punct cît mai apropiat de cuplul critic M_k.

c. Regimul de frînare prin contraconectare

În cazul schimbării sensului de rotație al rotorului față de cîmpul învîrtitor din stator, apare frînarea prin contraconectare. Această situație apare fie atunci *cînd mecanismul, antrenînd motorul în sensul cuplului rezistent, învinge cuplul motor, fie atunci cînd se face inversarea a două faze ale statorului.*

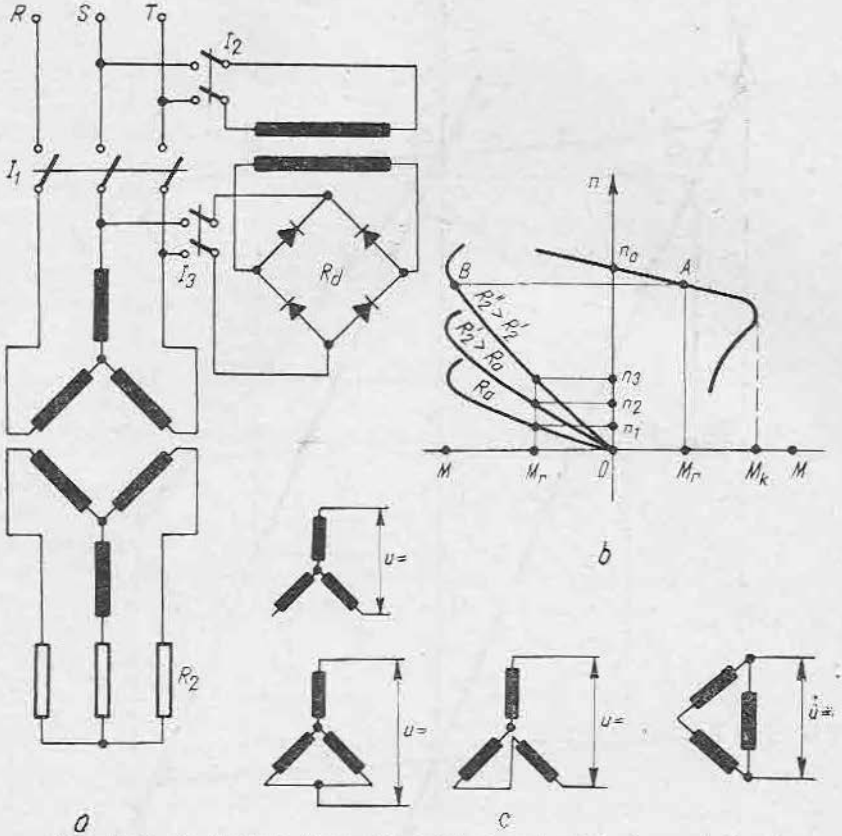


Fig. 12.61. Regimul de frînare dinamică al motorului asincron trifazat:
a — schema electrică de conectare a înfăşurărilor statorice şi rotorice; *b* — caracteristicile de frînare obţinute pentru diferite rezistenţe conectate în rotor;
c — scheme de conectare a înfăşurărilor statorice în acest regim.

● **Contraconectarea prin învîrtirea de către mecanism a rotorului în sens invers faţă de cîmpul învîrtitor.** *În cazul tipic al mecanismului de ridicare a sarcinii la podul rulant,* se consideră că motorul funcţionează în sensul ridicării şi punctul de funcţionare A_1 (fig. 12.62) se află pe caracteristica mecanică naturală *1*. Conectînd în rotor o rezistenţă $R_1 > R_a$, punctul de funcţionare corespunzător cuplului rezistent M_r se va deplasa pe caracteristica artificială *2* în punctul A_2. Viteza de rotaţie va fi mai mică $n_2 < n_1$. Dacă se introduce în circuitul rotoric o rezistenţă şi mai mare $R_2 > R_1$ se poate ajunge în situaţia în care cuplul motor corespunzător punctului K_3 nu mai poate satisface cuplul rezistent M_r. Agregatul se opreşte şi începe să coboare, antrenînd rotorul motorului în sens invers, punctul de funcţionare stabilindu-se în A_3, cadranul IV. Cuplul dezvoltat de motor în acest punct egalează cuplul rezistent şi astfel sarcina continuă să coboare cu viteza n_3.

La fel ca în cazul frînării în regim de recuperare a energiei, se obţine o limitare a vitezei, cu avantajul că prin introducerea de rezistenţe corespunzătoare în circuitul rotoric se pot obţine orice valori ale vitezei de coborîre mai mici decît n_0.

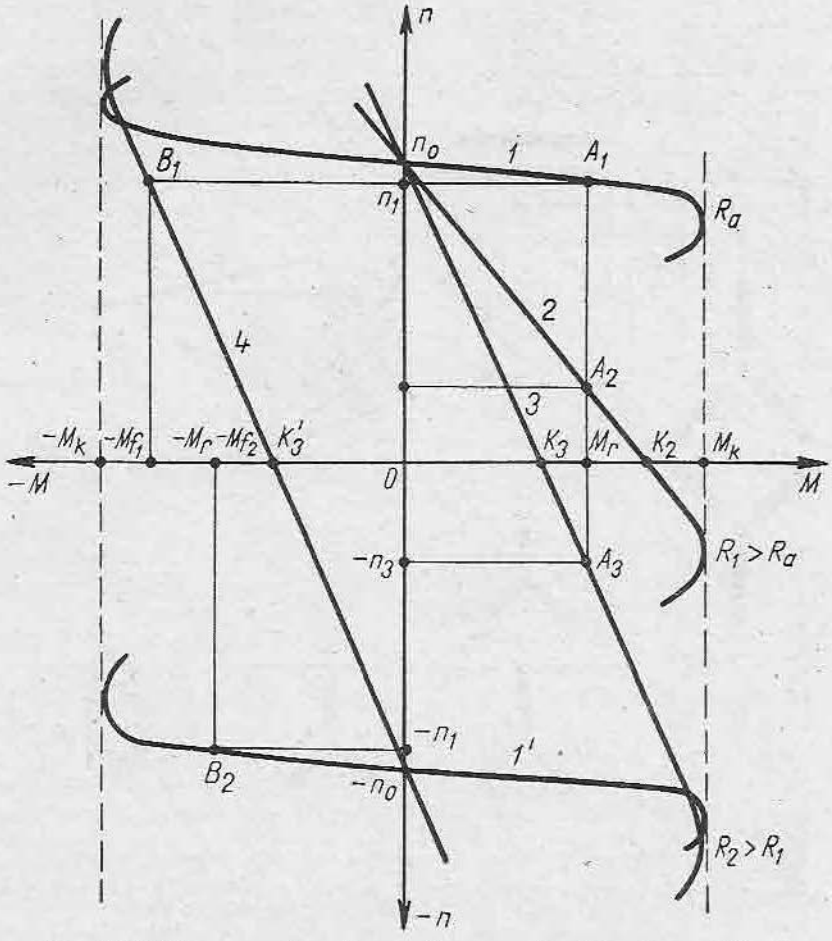


Fig. 12.62. Frînarea prin contraconectare a motorului asincron trifazat.

Energia provenită de la sarcină, la fel ca și energia electrică absorbită din rețea se consumă aproape integral prin rezistența circuitului rotoric.

● **Contraconectarea prin inversarea a două faze statorice** se poate utiliza atît la motoarele asincrone în scurtcircuit, cît și la cele cu rotorul bobinat. Rezistențele pentru limitarea curenților mari din timpul frînării se introduc în cazul motoarelor în scurtcircuit în circuitul înfășurărilor statorice.

În cazul acestui tip de contraconectare, se modifică sensul de rotație al cîmpului învîrtitor, prin inversarea a două faze statorice.

Considerînd că motorul funcționează în punctul A_1, din cadranul 1 (fig. 12.62), în momentul inversării fazelor statorice punctul de funcționare se mută pe curba *4* paralelă și simetrică față de punctul *O* cu curba *3* (dacă în circuitul rotoric este inclusă aceeași rezistență $R_2 > R_a$). Cuplul dezvoltat de motor devine cuplu de frînare, avînd valoarea $-M_{f1}$, în punctul B_1, viteza de rotație scade și cînd ajunge punctul K_3, are valoarea zero.

Se observă că, *spre deosebire de frînarea dinamică la care, în momentul opririi motorului, cuplul de frînare se anulează, la frînarea prin contraconectare cuplul își menține o valoare importantă* — M_{f2}. Din această cauză, frînarea prin contraconectare este mult mai rapidă.

În momentul opririi motorului, este necesar să se facă deconectarea lui de la rețea, lucru care se realizează cu ajutorul unui releu de turație care comandă deconectare.

În cazul că nu se comandă deconectarea în momentul opririi, este necesar să se scoată totuși rezistența $R_2 > R_a$ din circuitul rotoric, pentru ca motorul să dezvolte un cuplu suficient pentru învingerea cuplului rezistent — M_r la funcționarea în sens invers a mecanismului. Motorul își inversează sensul de rotație, pornind pe caracteristica $1'$ și ajungînd în punctul de funcționare B_2.

5. VARIEREA VITEZEI DE ROTAȚIE

a. Varierea prin schimbarea numărului de poli ai înfășurării statorice

Această metodă *se aplică la motoarele asincrone în scurtcircuit, special construite pentru a se putea efectua modificări în modul de legare al înfășurărilor statorice.*

Se știe că viteza de sincronism a motoarelor asincrone este invers proporțională cu numărul de perechi de poli p:

$$n_0 = \frac{60f_1}{p}.$$

Rezultă că este posibil ca prin modificarea conexiunilor înfășurărilor statorice din stea în stea dublă sau din triunghi în stea dublă (fig. 12.63) să se obțină viteze de sincronism diferite.

Se construiesc motoare cu două sau chiar trei posibilități de legare a înfășurărilor, cărora le corespund două sau trei viteze diferite.

În figura 12.64 sînt reprezentate caracteristicile mecanice corespunzătoare unor conexiuni diferite ale înfășurărilor statorice.

Se observă că *trecerea de la viteza superioară 2n la viteza inferioară n* se face în regim de frînare cu recuperarea în rețea a energiei. Într-adevăr, din

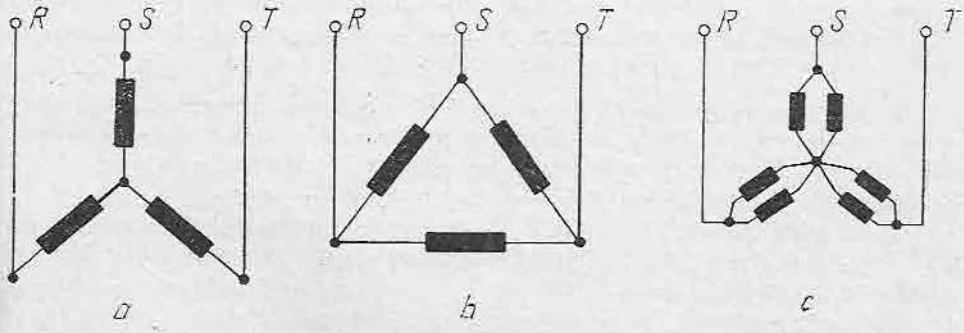


Fig. 12.63. Diferite moduri de legare a înfășurărilor statorice ale motorului asincron trifazat: *a* — stea; *b* — triunghi; *c* — stea dublă.

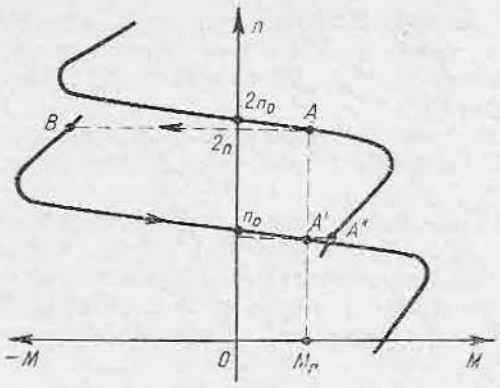


Fig. 12.64. Caracteristicile mecanice ale unui motor cu numărul de perechi de poli (viteza de rotație n) și ale unui motor cu număr de perechi de poli $p/2$ (viteza de rotație $2n$).

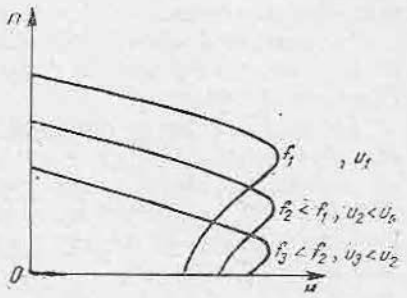


Fig. 12.65. Caracteristicile mecanice artificiale ale motorului asincron trifazat, obținute prin variația simultană a frecvenței și tensiunii de alimentare.

punctul de funcționare A, prin modificarea conexiunii, se trece în punctul B și motorul frînează (în regim generator) pînă în punctul A' corespunzător cuplului rezistent M_r, iar funcționarea sistemului se stabilizează la viteza n. *Trecerea de la viteza inferioară la viteza superioară* se face pe caracteristica naturală de pornire, punctul de funcționare trecînd din A' în A'' și ajungînd în final în punctul A corespunzător cuplului M_r.

Acest mod de variere a vitezei este foarte economic și se utilizează în toate acționările care necesită numai 2 — 3 trepte de viteză cu trecere rapidă de la una la alta.

b. Varierea prin modificarea tensiunii de alimentare și a frecvenței

În figurile 12.54 și 12.55 au fost prezentate grafic caracteristicile artificiale obținute prin alimentarea cu tensiune și frecvență variabilă a motorului asincron.

● **Varierea vitezei prin modificarea tensiunii de alimentare** are dezavantajul că cuplul critic, ca și cel de pornire, scade cu pătratul tensiunii. De asemenea, rigiditatea caracteristicii scade cu scăderea tensiunii.

● **Varierea vitezei prin micșorarea frecvenței** are avantajul că se obțin caracteristici rigide, dar are dezavantajul creșterii cuplului critic și de pornire, care sînt invers proporționale cu pătratul frecvenței.

Notă. Dacă se procedează la o micșorare a frecvenței, micșorînd în același timp și tensiunea, se obțin caracteristicile artificiale din figura 12.65. În acest fel se menține o rigiditate suficientă a caracteristicilor, cuplul critic rămînînd constant.

Gama de reglaj în domeniul vitezelor inferioare ajunge pînă la 10 : 1, varierea făcîndu-se în trepte sau continuu și fiind necesar un convertizor de frecvență corespunzător.

c. **Varierea prin modificarea rezistenței din circuitul rotoric**

În figura 12.53 s-a arătat posibilitatea reglării de viteză prin introducerea rezistențelor în circuitul rotoric.

O precizare necesară este aceea că rezistențele pentru reglarea vitezei servesc și pentru pornire, dar sînt mai larg dimensionate decît rezistențele care servesc numai pentru pornire, datorită faptului că sînt mai mult timp conectate în circuitul rotoric și trebuie să disipeze în exterior o cantitate mai mare de căldură.

Cu cît rezistențele introduse în circuitul rotoric sînt mai mari, viteza scade, *gama de reglaj* fiind de 3 : 1.

Reglajul nu este riguros continuu, deoarece variația rezistenței se poate face numai în trepte, iar rigiditatea caracteristicilor mecanice scade. Pentru a mări gama de reglaj la 5 : 1 este necesar să se utilizeze metode speciale de stabilizare a vitezei, de exemplu folosirea ridicătorului electrohidraulic de frînă ca regulator de turație.

Un alt dezavantaj este acela al pierderii de energie în rezistențe.

Sistemul de reglare a vitezei motoarelor asincrone prin introducerea rezistențelor în circuitul rotoric *este recomandat în cazul mecanismelor care lucrează în regim de scurtă durată sau intermitent și este utilizat în special la mecanismele de deplasare și de ridicare ale podurilor rulante.*

G. MOTORUL SINCRON

1. CARACTERISTICI MECANICE

● **Caracteristica mecanică n = f(M)** este reprezentată în figura 12.66 și este o paralelă la axa cuplurilor, care trece prin punctul n_0 de pe axa vitezelor și este limitată de cuplurile — M_{max} și M_{max} la care se produce ieșirea din sincronism a motorului, și deci oprirea lui.

● În figura 12.67 este reprezentată **caracteristica unghiulară** atît pentru motorul sincron cu poli înecați (fig. 12.67, *a*), cît și pentru cel cu poli aparenți (fig. 12.67, *b*).

În cazul motorului sincron cu poli înecați, valoarea cuplului electromagnetic are expresia:

$$M = M_{max} \sin \theta,$$

unde θ este decalajul între axele polilor cîmpului învîrtitor statoric și axele polilor de nume contrar ai rotorului.

Cuplul M_{max} fiind constant și depinzînd de caracteristicile rețelei și ale motorului, rezultă că se poate reprezenta caracteristica unghiulară a motorului sincron cu poli înecați ca o sinusoidă cu valoarea maximă M_{max}.

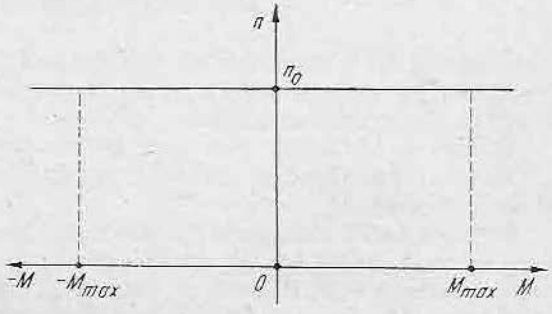


Fig. 12.66. Caracteristica mecanică $n = f(M)$ a motorului sincron.

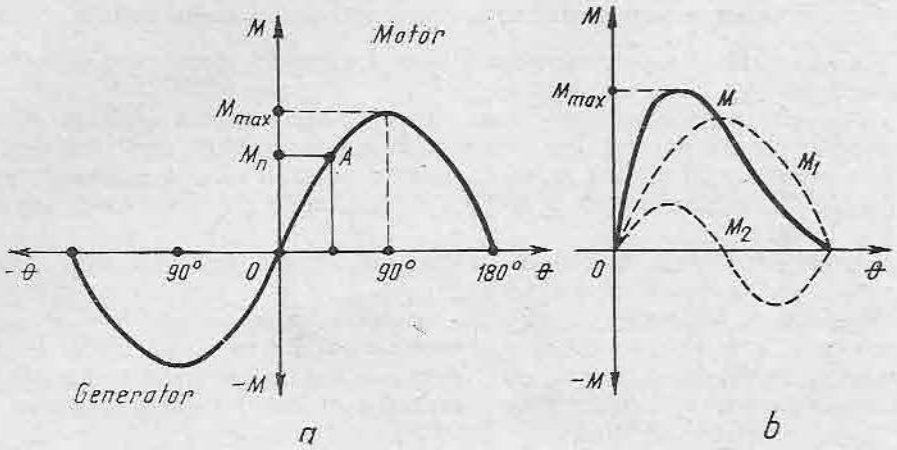


Fig. 12.67. Caracteristica unghiulară $M = f(\theta)$ a motorului sincron: *a* — cu poli înecați; *b* — cu poli aparenți.

La motorul cu poli aparenți se suprapune o componentă sinusoidală cu perioada dublă ($\sin 2\theta$). Rezultă o caracteristică mecanică unghiulară mai rigidă.

2. REGIMURI DE FUNCȚIONARE

a. Regimul de pornire

Pentru a fi posibilă pornirea motorului sincron în sarcină și fără mașini auxiliare, se folosește pornirea în asincron.

Rotorul este prevăzut cu o colivie de pornire în asincron, identică cu cea de la motoarele asincrone. *Pornirea se face cu înfășurarea rotorică închisă pe o rezistență și numai în momentul apropierii de viteza de sincronism este alimentată cu curent continuu.*

În capitolul 16 se studiază diferitele aspecte ale pornirii în asincron și se dau scheme de pornire în asincron pentru motoarele sincrone.

b. Regimul de frînare dinamică

Se decuplează statorul motorului sincron de la rețeaua de alimentare și se conectează pe o rezistență de frînare trifazată. Rotorul rămîne alimentat de la sursa de curent continuu.

În figura 12.68 sînt reprezentate caracteristicile mecanice de frînare.

Motorul funcționează în mod normal în punctul A, corespunzător cuplului rezistent M_r.

În momentul deconectării statorului de la rețea, punctul de funcționare se mută în B_1 sau B_2 pe una din caracteristicile de frînare corespunzătoare rezistenței de frînare R_{f1} sau R_{f2}. Cuplul revine cuplu de frînare cu valoarea $-M_{f1}$ sau $-M_{f2}$ și viteza motorului scade, anulîndu-se odată cu cuplul de frînare.

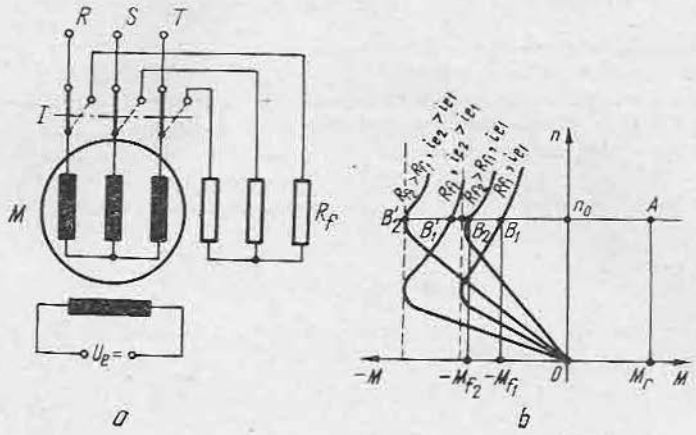


Fig. 12.68. Regimul de frînare dinamică a motorului sincron:
a — schema electrică de conectare a înfăşurărilor statorice şi rotorice; *b* — caracteristicile de frînare obţinute pentru diferite rezistenţe de frînare şi diferiţi curenţi de excitaţie.

Panta caracteristicii de frînare depinde şi de curentul de excitaţie (i_{e_1}, $i_{e_2} > i_{e_1}$).

REZUMAT

● *Caracteristica mecanică* a motoarelor electrice reprezintă dependenţa dintre turaţie şi cuplul în regim staţionar.

● *Caracteristica mecanică naturală* corespunde parametrilor nominali ai electromotorului.

● *Acţionările electrice cu variaţie de viteză* se apreciază prin indici de calitate: gama de reglaj, sensul variaţiei de viteză, fineţea variaţiei de viteză, variaţia cuplului admisibil în domeniul de variaţie a vitezei, randamentul instalaţiei pentru variaţia de viteză şi raportul dintre variaţia vitezei de mers în gol şi a vitezei de mers în sarcină.

● *Caracteristicile artificiale* ale motoarelor de curent continuu se obţin prin variaţia următorilor parametri: tensiunea de alimentare, rezistenţa indusului, fluxul de excitaţie.

● *Pornirea motoarelor de curent continuu* se face pe caracteristici artificiale, cu ajutorul reostatelor de pornire. Rezistenţele reostatului limitează curentul de pornire în domeniul valorilor admisibile şi asigură cuplul necesar pornirii.

● *Calculul rezistenţelor de pornire* se bazează pe proporţionalitatea acestora cu căderile de turaţie pe care le produc.

● *Frînarea motoarelor de c.c.* se poate obţine: prin contraconectare, prin recuperarea energiei electrice şi dinamice.

● *Grupul generator-motor* (Ward-Leonhard) $G - M$ cuprinde:

— motor asincron trifazat;
— excitatoare cu excitaţie derivaţie;
— generator cu excitaţie separată;
— rotor cu excitaţie separată.

● Manevrarea grupului $G - M$ se realizează astfel:

Pornirea — prin variația curentului de excitație al generatorului;

Reglarea vitezei — prin variația curentului de excitație ai generatorului de la n_{min} la n_n și prin slăbirea cîmpului motorului de la n_n la n_M.

Frînarea — prin deconectarea excitației generatorului și conectarea ei pe o rezistență.

Reversarea — prin schimbarea polarității la excitația generatorului.

Caracteristicile mecanice ale motorului asincron:

- *naturală*:
  - $M = \dfrac{2M_k}{\dfrac{s}{s_k} + \dfrac{s_k}{s}}$:
  - $s_k = K_2 \dfrac{R_2}{f_1}$
  - $M_k = K_1 \dfrac{U_1^2}{f_1^2}$
- *artificiale*:
  - Prin creșterea rezistenței R_2 { — crește s_k; — M_k constant
  - Prin scăderea tensiunii $U_1(V_1)$ { — s_k constant; — scade M_k
  - Prin variația frecvenței f_1:
    - — creșterea { — scade s_k; — scade M_k
    - — scăderea { — crește s_k; — crește M_k

● Manevrarea motorului asincron:

Pornirea:
- — rezistențe rotorice de pornire
- — reducerea tensiunii { — cu comutator stea-triunghi; — cu rezistențe statorice; — cu bobine de reactanță statorice; — cu autotransformator

Frînarea:
- — cu recuperarea energiei în rețea
- — dinamică
- — contraconectare { — prin rotirea rotorului în sens opus cîmpului învîrtitor; — prin schimbarea sensului cîmpului învîrtitor

Varierea turației:
- — prin schimbarea numărului de poli
- — prin variația combinată a tensiunii și frecvenței de alimentare
- — prin modificarea rezistenței din circuitul rotoric.

- Caracteristici mecanice ale motorului sincron
  - $n = f(M)$ — rigidă între $-M_{max}$ și $+M_{max}$
  - unghiulară $M = M_{max} \sin \theta$
- Manevrarea motorului sincron:

pornire — în asincron
frînare — dinamică

1. VERIFICAREA CUNOȘTINȚELOR

1. Care sînt metodele de obținere a caracteristicilor artificiale ale motoarelor?
2. Care este valoarea relativă procentuală a vitezei de 500 rot/min pentru un motor avînd viteza de mers în gol de 1 000 rot/min?
3. O hiperbolă $M = f(n)$ caracterizează o variație de viteză cu:
   a — cuplu constant;
   b — putere constantă?
4. Care este valoarea raportului constantelor electrice și magnetice a unui motor de c.c.?
   a — 0,2;
   b — 0,15;
   c — 0,1.
5. Care este mărimea procentuală a curentului de excitație pentru un motor derivație, raportată la curentul nominal?
   a — 1 ... 10%;
   b — 3 ... 15%;
   c — 20%.
6. Ce fel de reglaj se folosește mai des în acționările electrice?
   a — monozonal sub caracteristica naturală;
   b — monozonal deasupra caracteristicii naturale;
   c — bizonal.
7. Care este poziția cuplului motor M față de cuplul de sarcină M_r la răsturnarea reglajului?

$$a - M > M_r; \quad b - M = M_r; \quad c - M < M_r.$$

8. Care sînt indicii de calitate la reglarea de viteză a unui motor derivație, prin metoda șuntării indusului?
9. Un motor de c.c. derivație are curentul de pornire limitat constructiv la 20 A. Se folosește o rezistență de pornire de 8 ohmi. Rezistența indusului este de 3 ohmi. Care este tensiunea nominală a motorului?
10. Prin ce metode se calculează reostatul de pornire al motorului derivație?
11. În ce mod se scurtcircuitează rezistențele de pornire și frînare ale unui motor de c.c.?
12. Un reostat de pornire poate fi folosit și pentru reglarea de viteză?
13. Care este ecuația echilibrului electric la frînarea prin contraconectare a unui motor derivație?
14. Frînarea prin contraconectare obținută prin funcționarea pe o caracteristică puternic căzătoare este:
   a — lină;
   b — bruscă.
15. În ce direcție se produce variația vitezei la frînare recuperativă?
16. Care este ecuația caracteristicii mecanice a motorului derivație la frînare dinamică?
17. Ce tip de frînare caracterizează expresia circuitului din relația:

$$I = \frac{R}{R_a + R_f}.$$

18. Frînarea dinamică se caracterizează prin oprire:
   a — precisă?
   b — nesigură?
19. Care este relația de legătură dintre fluxul inductor și curentul principal în motorul serie?

20. Ce sînt caracteristicile universale ale unui tip de motoare serie?

21. Ecuația caracteristicii mecanice pentru motorul serie exprimă inversa proporționalitate între cuplu și viteza la putere:

a — întîia?

b — a doua?

c — 0,5?

22. Cum se obține inversarea sensului de rotație la motorul de c.c.?

a — prin inversarea conexiunilor la indus?

b — prin inversarea conexiunilor la înfășurarea de excitație?

23. Căderea de viteză Δn pentru caracteristicile artificiale ale motorului serie, la un curent absorbit constant depinde de:

a — saturația motorului?

b — rezistența din circuitul principal?

c — tensiunea de alimentare?

24. Pentru care valoare a rezistenței indusului se obține caracteristica limită a motorului serie?

25. Care este domeniul de variație al curentului în timpul pornirii motorului serie?

a — $(0{,}8 \ldots 1{,}2)\ I_n$;

b — $(1 \ldots 2)\ I_n$;

c — $(1{,}5 \ldots 2{,}5)\ I_n$.

26. Frînarea recuperativă a motorului serie se realizează numai cu ajutorul unui aparataj complex; cărui detaliu al caracteristicii mecanice pentru motorul serie se datorește acest fapt?

27. Frînarea prin contraconectare nu este folosită la acționările cu motoare serie pentru ridicarea greutăților. Care este cauza?

28. Care sînt cele două posibilități de a frîna dinamic un motor serie?

29. Cîmpul magnetic produs de înfășurările de excitație ale motorului compund este rezultant și obținut prin:

a — scădere;

b — adunare?

30. Să se indice pentru motorul compound o proprietate favorabilă similară cu aceea a motorului serie și alta similară cu aceea a motorului derivație.

31. Care este gama de reglare a vitezei la grupul generator-motor dacă se ține cont de creșterea turației peste valoarea nominală, prin micșorarea fluxului inductor la motor?

32. În ce regim lucrează fiecare din mașinile grupului generator-motor în cazul frînării?

33. Cum se face reversarea grupului generator-motor?

34. Ce este alunecarea și ce semn are în regim motor? Dar în regim generator?

35. Ce sînt cuplul critic M_k și alunecarea critică s_k?

36. Ce se întîmplă cînd cuplul de pornire M_p este mai mic decît cuplul rezistent?

37. Ce factori pot fi modificați pentru obținerea caracteristicilor mecanice artificiale ale motorului asincron?

38. Care sînt avantajele și dezavantajele caracteristicilor artificiale obținute prin variația rezistențelor din circuitul rotoric?

39. Dar prin variația tensiunii de alimentare?

40. Dar prin variația frecvenței tensiunii de alimentare?

41. Pe ce relații se bazează calculul grafic al rezistențelor de pornire?

42. Care sînt metodele cele mai cunoscute de pornire a motoarelor asincrone?

43. Cum se ajunge la regimul de frînare cu recuperarea energiei la motoarele asincrone?

44. Ce deosebire esențială există între variația cuplului de frînare la frînarea dinamică și a cuplului de frînare la frînarea contracurent, în cazul motorului asincron?

45. Care sînt cele două regimuri de contraconectare la motorul asincron și în ce constau?

46. Care sînt metodele cele mai utilizate pentru varierea vitezei de rotație a motorului asincron?

47. De ce este limitată caracteristica motorului sincron $[n = f(M)]$ la valorile M_{max} și $-M_{max}$?

48. Ce componentă intervine în caracteristica unghiulară a motorului sincron cu poli aparenți?

49. În ce constă frînarea dinamică la motorul sincron?

Capitolul 13

REGIMURI TRANZITORII ÎN ACȚIONĂRILE ELECTRICE

A. NOȚIUNI GENERALE

● **Stările stabile.** Motorul electric poate *să fie în stare de repaus, să funcționeze pe o anumită treaptă de viteză n* căreia îi corespund anumite valori ale cuplului M și curentului i, sau *să funcționeze la parametrii nominali* n_n, M_n, I_n. În toate aceste cazuri, motorul se află într-o stare stabilă, staționară, dacă parametrii luați în considerație se mențin constanți.

● **Trecerea dintr-o stare stabilă de funcționare în alta** are caracter de:

— *pornire* (atunci cînd se trece de la o viteză inferioară (zero) la una superioară);

— *frînare* (atunci cînd se trece de la o viteză superioară la una inferioară).

Pornirea și frînarea motorului nu se fac instantaneu, datorită factorilor care se opun trecerii de la o stare stabilită la alta:

— inerțiile mecanice care se opun accelerării și decelerării maselor în mișcare;

— inerțiile electromagnetice care se opun variației bruște a tensiunii în circuitele electromagnetice;

— inerțiile termice care se opun creșterii bruște a cantității de căldură degajate în fierul mașinii și în înfășurări.

Pornirea și frînarea motorului electric sînt deci caracterizate prin procese tranzitorii mecanice, electromagnetice și termice, în cadrul cărora, într-un anumit interval de timp, viteza, cuplul și curentul își modifică valorile corespunzătoare stării inițiale, atingînd la sfîrșitul intervalului valorile corespunzătoare stării finale.

Modificarea vitezei, cuplului și curentului se face după anumite legi care se studiază în acest capitol și depind de caracteristicile mecanice și electrice ale sistemului motor-mașină de lucru.

Pornirea și frînarea motorului electric pot fi influențate cu ajutorul rezistențelor sau altor dispozitive de pornire și frînare.

Studiul proceselor tranzitorii este foarte important, deoarece permite ca pentru o acționare dată să se stabilească dacă procesul tranzitoriu respectiv corespunde cu cerințele acționării.

● **Cerințele acționărilor** sînt multiple și se amintesc aici cîteva dintre ele:

— *timpul de pornire și frînare să fie cît mai scurt posibil*, pentru a elimina timpii morți în acționările cu porniri și frînări frecvente;

— *variația vitezei la pornire și frînare să nu fie prea rapidă* pentru a nu se atinge valori inadmisibile ale accelerațiilor și decelerațiilor;

— *cuplul de pornire și frînare să nu atingă valori inadmisibile din punct de vedere mecanic;*

— *curentul de pornire și frînare să fie menținut între limite care nu pot crea șocuri dăunătoare în rețea și nu pot duce la încălzirea exagerată a motorului.*

B. PROCESE TRANZITORII ALE ACȚIONĂRILOR CU MOTOARE DE CURENT CONTINUU

În acest paragraf se va studia procesul tranzitoriu electromecanic din timpul pornirii motorului derivație de curent continuu.

Pornind de la ecuația fundamentală a mișcării:

$$M - M_d - M_r = 0,$$

$$M = M_d + M_r,$$

$$M = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} + M_r,$$

și ținînd seama că la motorul derivație de curent continuu cuplul este proporțional cu curentul tranzitoriu i prin circuitul indusului:

$$M = C_m \Phi i = C'_m i,$$

se poate scrie:

$$\boxed{C'_m i = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt} + M_r} \tag{13.1}$$

În același timp se poate scrie ecuația echilibrului electric pentru motorul derivație de curent continuu (rel. 12.3):

$$U = E + Ri = C_e \Phi n + Ri$$

$$\boxed{U = C'_e n + Ri} \tag{13.2}$$

Dacă se deduce expresia lui i din relația (13.1) și se introduce în relația (13.2), se obține:

$$\frac{U}{C'_e} = n + \frac{GD^2 \cdot R}{375 C'_e C'_m} \cdot \frac{dn}{dt} + \frac{R}{C'_e C'_m} M_r.$$

În această ecuație se introduce viteza ideală de mers în gol:

$$n_0 = \frac{U}{C'_e}$$

și se notează:

$$\boxed{\frac{GD^2 \cdot R}{375 C'_e C'_m} = T;} \tag{13.3}$$

$$\frac{R}{C'_e C'_m} M_r = \Delta n_r.$$

Ecuația devine:

$$n_0 = n + T \frac{dn}{dt} + \Delta n_r. \tag{13.4}$$

În această ecuație diferențială de gradul întîi n_0 este deci viteza ideală de mers în gol, n — viteza de rotație la un moment dat, T — *constantă electromecanică*, iar Δn_r — căderea de viteză datorită cuplului rezistent. Termenul $T \frac{dn}{dt}$ reprezintă *căderea de viteză datorită cuplului dinamic.*

Constanta electromecanică T conține atît elemente electrice (C'_e, R), cît și elemente mecanice ($C'_m GD^2$), are dimensiunile unui timp și se mai numește și *timpul specific de accelerare.*

De reținut: *Procesul tranzitoriu de creștere a vitezei este determinat de constanta electromecanică T. Cu cît aceasta este mai mare, căderea de viteză datorită cuplului dinamic este mai mare și pornirea se face mai greu.*

Prin rezolvarea ecuației (13.4) se obține:

$$n = n_r + (n_i - n_r)\, e^{-\frac{t}{T}} \tag{13.5}$$

aceasta fiind legea exponențială de variație a vitezei în timpul pornirii motorului de curent continuu derivație de la viteza inițială n_i.

Cînd motorul este pornit din starea de repaus ($n_i = 0$);

$$n = n_r + (n_i - n_r)\, e^{-\frac{t}{T}} \tag{13.6}$$

$n_r = n_0 - \Delta n_r$ reprezintă valoarea de regim a vitezei motorului, care se obține la sfîrșitul procesului tranzitoriu.

Teoretic, pentru a se atinge valoarea de regim a vitezei, ar trebui să treacă un timp $t = \infty$:

$$n = n_r + (n_i - n_r)\, e^{-\frac{\infty}{T}} = n_r.$$

Practic, în cazul pornirii din starea de repaus, după trecerea unui timp $t = 4T$:

$$n = n_r \left(1 - e^{-\frac{4T}{T}}\right) = 0{,}98\, n_r,$$

deci viteza de rotație este foarte apropiată de valoarea de regim.

În figura 13.1 este reprezentată grafic variația vitezei în timpul pornirii.

În figura 13.2 este reprezentată grafic **variația vitezei în cazul pornirii cu rezistență de pornire cu trei trepte**: R_1, R_2, R_3.

Pe prima treaptă de pornire, de la timpul zero la t_1, în cir-

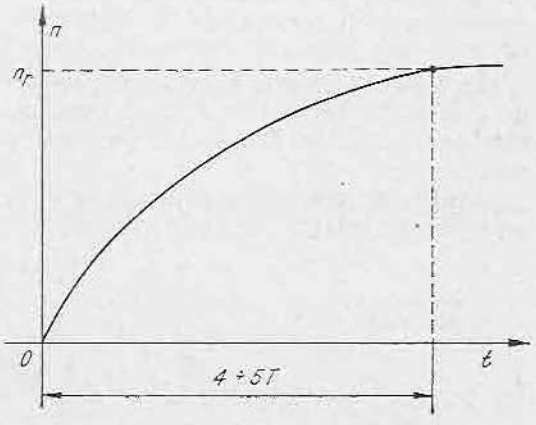


Fig. 13.1. Variația vitezei de rotație n în timpul pornirii motorului derivație de curent continuu.

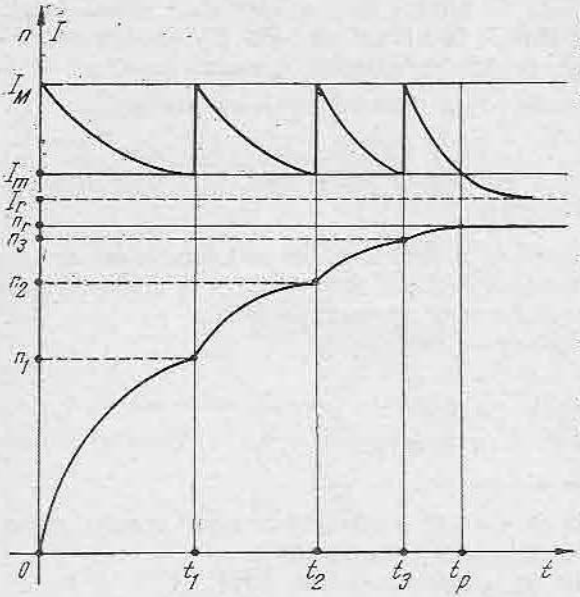


Fig. 13.2. Variația vitezei de rotație n și a curentului I în timpul pornirii cu rezistență în trei trepte, luînd în considerație numai regimul tranzitoriu electromecanic.

cuitul indusului este inclusă rezistența R_1 și constanta electromecanică are valoarea maximă:

$$T_1 = \frac{GD^2 \cdot R_1}{375\, C_e C'_m}.$$

Constanta electromagnetică fiind mare, atingerea vitezei de regim n_r ar necesita un timp îndelungat, dar în momentul t_1, la valoarea n_1 a vitezei, se scurtcircuitează o parte din rezistență și în circuit rămîne inclusă rezistența R_2 mai mică. Constanta electromecanică T_2 este și ea mai mică și viteza crește mai repede. În momentul t_2 se scurtcircuitează din nou o parte din rezistență și rămîne în circuit rezistența R_3, constanta electromecanică fiind T_3. În momentul t_3 se scurtcircuitează întreaga rezistență de pornire și constanta electromecanică are valoarea cea mai mică:

$$T_a = \frac{GD^2 \cdot R_a}{375\, C'_e C'_m}.$$

Pe curba exponențială caracterizată de această constantă electromecanică, viteza crește, tinzînd să atingă valoarea de regim n_r.

Prin folosirea rezistențelor de pornire s-a mărit timpul de pornire total, datorită măririi constantelor electromecanice, dar s-a asigurat o pornire lină, cu accelerații și curenți în limitele admisibile.

În figura 13.2 este arătată, de asemenea, și variația curentului absorbit de indusul motorului în timpul pornirii, între limitele I_M și I_m, corespunzătoare cuplurilor M_M și M_m pe baza cărora s-au calculat rezistențele de pornire.

Pentru determinarea expresiei analitice a curentului în timpul pornirii, se folosește relația (13.1) în care se înlocuiește

$$M_r = C'_m I_r,$$

deci se poate scrie:

$$C'_m i = C'_m I_r + \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt},$$

$$i = I_r + \frac{GD^2}{375\, C'_m} \cdot \frac{dn}{dt}; \qquad (13.7)$$

I_r este valoarea de regim a curentului care se atinge la sfîrșitul regimului tranzitoriu, cînd $M_d = 0$, deci $M = M_r = \text{constant}$.

Derivînd relația (13.5), se obține o valoare $\frac{dn}{dt}$ care se introduce în relația (13.7). Prin rezolvarea ecuației diferențiale obținute, rezultă o expresie a curentului similară celei obținute pentru viteză:

$$\boxed{i = I_r + (I_r - I_r)e^{-\frac{t}{T}}} \tag{13.8}$$

Deosebirea constă în faptul că turația crește, iar curentul scade după niște curbe exponențiale corespunzătoare treptelor de pornire, tinzînd asimptotic către valoarea de regim I_r.

În cazul pornirii cu rezistențe de pornire reprezentată în figura 13.2, *curentul inițial* este:

$$I_i = \frac{U}{R_2} = I_M.$$

Curentul de regim este:

$$I_r = \frac{U - E}{R_a} = \frac{U - C_e' n_r}{R_a} < I_m.$$

Cuplul motorului derivație este proporțional cu curentul, deci variația cuplului în timpul pornirii este similară cu a curentului.

$$M = M_r + (M_i - M_r)\, e^{-\frac{t}{T}} \tag{13.9}$$

Cuplul variază și el între limitele M_M și M_m, iar spre sfîrșitul regimului tranzitoriu tinde asimptotic către valoarea M_r.

Timpii de pornire pe diferite trepte $t_1, t_2, \ldots, t_p$ scad în același raport ca și constantele electromecanice $T_1 < T_2 < T_3 < T$.

C. PROCESE TRANZITORII ALE ACȚIONĂRILOR CU MOTOARE ASINCRONE

În cele ce urmează se vor studia procesele tranzitorii în **ipotezele simplificatoare**:

— *cuplul rezistent* $M_r = 0$;

— *se iau în considerație numai procesele tranzitorii electromecanice.*

Conform primei ipoteze, ecuația echilibrului mecanic:

$$M - M_r - M_d = 0$$

devine:

$$M = M_d.$$

Cuplul are expresia cunoscută:

$$M = \frac{2M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}}, \tag{13.10}$$

în care M_k este cuplul maxim (critic) pe caracteristica mecanică a motorului asincron, iar s_k — alunecarea corespunzătoare cuplului maxim.

Pe de altă parte, se scrie expresia cuplului dinamic:

$$M_d = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt}.$$

Se știe că alunecarea s este determinată de expresia

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0},$$

în care n_0 este turația de sincronism, iar n— turația la un moment dat.

Deci:

$$n = n_0 - n_0 s$$

$$\frac{dn}{dt} = - n_0 \frac{ds}{dt}.$$

Revenind la expresia cuplului dinamic, se poate scrie:

$$M_d = - n_0 \frac{GD^2}{375} \frac{ds}{dt}. \tag{13.11}$$

Se poate scrie ecuația echilibrului mecanic conform relațiilor (13.10) și (13.11):

$$\boxed{\frac{2M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}} = - n_0 \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{ds}{dt}} \tag{13.12}$$

$$dt = - \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{n_0}{2M_k} \left(\frac{s}{s_k} + \frac{s}{s_k} \right) ds,$$

sau:

$$dt = - \frac{T}{2} \left(\frac{s}{s_k} + \frac{s}{s_k} \right) ds, \tag{13.13}$$

unde s-a notat cu T constanta electromecanică de timp:

$$T = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{n_0}{M_k}. \tag{13.14}$$

Prin integrarea relației (13.13) se obține expresia generală a timpului de desfășurare a proceselor tranzitorii de pornire, frînare sau inversarea sensului de rotație:

$$t = \frac{T}{2}\left(\frac{s_1^2 - s_2^2}{2s_k} + s_k \ln \frac{s_1}{s_2}\right) \tag{13.15}$$

în care s_1 și s_2 sînt alunecările inițială și finală ale procesului tranzitoriu luat în considerație.

În cazul pornirii, $s_1 = 1$ și $s_2 = s_n$.

În cazul frînării contracurent, $s_1 = 2$ și $s_2 = 1$.

Rezultă de aici valorile timpului de pornire și frînare:

$$t_p = \frac{T}{2}\left(\frac{1 - s_n^2}{2s_k} + s_k \ln \frac{1}{s_n}\right) \tag{13.16}$$

$$t_f = \frac{T}{2}\left(\frac{4-1}{2s_k} + s_k \ln \frac{2}{1}\right) = \frac{T}{2}\left(\frac{3}{2s_k} + s_k \ln 2\right);$$

$$t_f = T\left(\frac{0{,}75}{s_k} + 0{,}345\, s_k\right) \tag{13.17}$$

Prin introducerea diferitelor trepte ale rezistenței de pornire $R_1 > R_2 > \ldots > R_a$, alunecarea s_k crește.

De asemenea, rezistența de frînare poate avea diferite valori corespunzînd cu diferite valori ale alunecării s_k.

Se pot determina valorile rezistențelor de pornire și frînare în așa fel încît să corespundă unor anumite alunecări s_k, pentru care timpul de pornire, respectiv frînare, să fie minim.

Astfel, de exemplu, *la pornire*, pentru $s_k = 0{,}407$;

$$t_{p\,min} = 1{,}22\ T.$$

La frînare, pentru $s_k = 1{,}47$;

$$t_{fmin} = 1{,}027\ T.$$

Se observă că motoarele electrice asincrone pornesc mult mai repede decît motoarele de curent continuu, la care $t_p = (4 \ldots 5)\ T$. Aceasta implică apariția unor șocuri mecanice mai mari, de care trebuie să se țină seama la dimensionarea organelor de cuplare și transmisie.

Dacă pornirea motorului se face în trepte, atunci treptelor R_1, R_2, ... R_a le vor corespunde constantele electromecanice T_1, $T_2 \ldots T_a$ și timpii de pornire t_{p1}, t_{p2}, ... t_{pa}.

Notă. În cele de mai sus s-au determinat timpii de pornire și frînare ai motoarelor asincrone, deoarece aceștia prezintă o mare importanță în realizarea schemelor de comandă a pornirii și frînării. Variația în timp a vitezei

de rotație, cuplului și curentului sînt mai dificil de determinat, deoarece ar necesita rezolvarea unor ecuații de echilibru electric și mecanic de o formă complexă.

În acest caz, este necesar ca să se apeleze și la metode grafice sau grafo-analitice.

REZUMAT

Motorul derivație de c.c. → Regim tranzitoriu pornire

$$n = n_r + (n_i - n_r)e^{\frac{-t}{T}}$$

$$M = M_r + (M_i - M_r)\,e^{\frac{-t}{T}}$$

Motorul asincron

— Regim tranzitoriu pornire → $t_p = \frac{T}{2}\left(\frac{1 - s_n^2}{2s_k} + s_k \ln \frac{1}{s_n}\right)$

— Regim tranzitoriu frînare → $t_f = T\left(\frac{0{,}75}{s_k} + 0{,}345\, s_k\right)$

VERIFICAREA CUNOȘTINȚELOR

1. Ce factori se opun trecerii motorului de la o stare stabilă la alta și care este efectul lor?
2. Ce fenomene dăunătoare se evită prin studiul proceselor tranzitorii și aplicarea măsurilor corespunzătoare?
3. De la ce ecuații pornește calculul regimului tranzitoriu din timpul pornirii motorului derivației de curent continuu?
4. Ce factori influențează constantele electromecanice de timp și cum se poate acționa asupra lor?
5. De la ce ecuații se pornește pentru calculul proceselor tranzitorii la motorul asincron și ce reprezintă fiecare termen al acestei ecuații?

Capitolul 14

ALEGEREA MOTOARELOR ELECTRICE DE ACȚIONARE

A. CRITERII CARE STAU LA BAZA ALEGERII MOTOARELOR ELECTRICE DE ACȚIONARE

Fiecare mașină de lucru are o caracteristică mecanică determinată printr-un grafic de sarcină.

În capitolul 11 caracteristicile mecanice sînt clasificate în cinci grupe principale.

Asigurarea productivității mașinii de lucru în condiții economice și a calității produsului sînt condiționate de asigurarea unui motor de acționare cît mai potrivit condițiilor care îi sînt impuse.

În capitolul 12 au fost analizate caracteristicile mecanice ale motoarelor electrice, stabilindu-se indicii de calitate ai acestora. Fiecare dintre caracteristicile mecanice ale motoarelor electrice se potrivește mai bine unei anumite grupe de caracteristici mecanice.

Din cele două exemple care urmează rezultă modul în care proiectantul determină tipul de motor, avînd o caracteristică mecanică care satisface optim o anumită acționare.

Exemple.

1. *Mecanismul de deplasare al căruciorului unui pod rulant* face parte din grupa 1. În funcție de greutatea suspendată în cîrlig, caracteristicile mecanice sînt reprezentate prin dreptele *1*, *2* și *3* din figura 14.1. Cunoscînd caracteristicile mecanice ale diferitelor electromotoare, proiectantul va alege un motor de curent continuu serie sau un motor de curent alternativ cu repulsie. Aceste motoare au caracteristică *suplă*, în măsură să răspundă cerinței exploatării. La sarcină mare M_3 (dreapta *3* din fig. 14.1), viteza de deplasare va fi n_3, adică redusă. La sarcină mică M_1 (dreapta *1*), viteza de deplasare va fi n_1, mai mare decît n_3.

2. *Mecanismul de translație al unui pod rulant.* Greutatea proprie a podului este mai mare decît a sarcinii. Variația sarcinii din cîrlig nu influențează decît în măsură mică cuplul static, după cum rezultă din caracteristica mecanică reprezentată în figura 14.2 Viteza de deplasare trebuie să fie cît mai

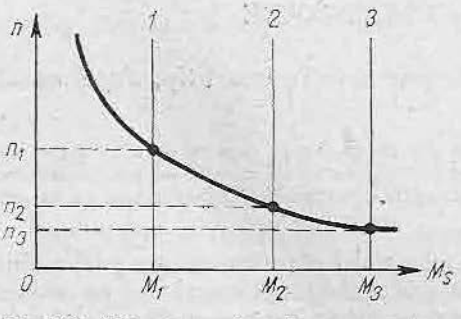


Fig. 14.1. Alegerea unui motor cu caracteristică suplă.

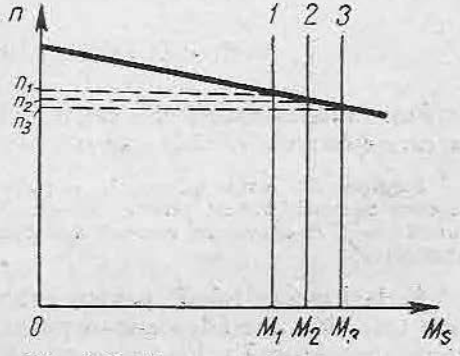


Fig. 14.2. Alegerea unui motor cu caracteristică rigidă.

constantă. În acest caz, proiectantul optează pentru un motor electric cu o caracteristică rigidă așa cum o au motoarele de curent continuu cu excitație derivație și motoarele asincrone.

Regimul de funcționare propriu mașinii de lucru constituie, de asemenea, un factor de bază în determinarea alegerii celui mai potrivit motor de acționare. Fabricile constructoare de mașini electrice produc motoare adecvate pentru fiecare regim de funcționare și indică performanțele aceluiași motor în diferite regimuri de funcționare.

Puterea motorului ales trebuie să fie cît mai apropiată de puterea necesară, rezultată din graficul caracteristicii mecanice de sarcină. O putere prea mare conduce la o folosire incompletă, cu randament scăzut și pierderi de energie; în cazul motoarelor asincrone se produce înrăutățirea factorului de putere, creșterea consumului de energie reactivă și limitarea capacității de transport a energiei active în rețeaua de distribuție. O putere mai mică decît cea necesară determină suprasolicitarea termică a motorului peste limitele admise și distrugerea izolației acestuia. Rezultă că numai dimensionarea corectă a puterii poate satisface atît cerințele procesului de producție, cît și economia alimentării cu energie.

Graficul vitezei mașinii de lucru este de asemenea un factor hotărîtor atît pentru determinarea organelor de transmisie, cît și pentru alegerea celui mai potrivit motor.

Motoarele electrice se construiesc pentru viteze de rotație impuse de standarde pentru motoarele de c.c. și în funcție de numărul de perechi de poli și de frecvență pentru motoarele de c.a.

Viteza mașinii de lucru fiind impusă de procesul tehnologic la o valoare diferită de viteza nominală a motorului, între mașina de lucru și motor se intercalează organe de transmisie de adaptare. Reductoarele introduc pierderi suplimentare de a căror compensare se ține seama la dimensionarea puterii motorului.

Trebuie avut în vedere că, la aceeași putere, gabaritul și prețul motorului este cu atît mai scăzut cu cît viteza nominală este mai mare.

Diferitele criterii de alegere a motorului de acționare sînt interdependente și de multe ori contradictorii. Din această cauză numai parcurgerea integrală a tuturor criteriilor de alegere, cunoașterea tuturor cerințelor procesului tehnologic și încadrarea acestuia în ansamblul economic, permit alegerea corectă a motoarelor electrice pentru acționarea mașinilor de lucru.

B. REGIMURI DE FUNCȚIONARE

Funcționarea motoarelor electrice se clasifică în regimuri tip, *după modul în care este atins echilibrul termic.*

Exemplu: Un motor asincron în scurtcircuit are un curent de pornire de circa șapte ori curentul nominal. Folosit pentru antrenarea unui transportor cu bandă cu funcționare pe durată lungă, de cîteva ore, motorul ales corespunzător caracteristicii de sarcină se va dovedi satisfăcător.

Același motor folosit pentru antrenarea unui cărucior pe un pod mobil care face cîteva zeci de manevre pe oră avînd același cuplu static se va dovedi necorespunzător. Explicația se găsește în modul în care se încălzește și este atins echilibrul termic al electromotorului. Numărul mare de porniri ale că-

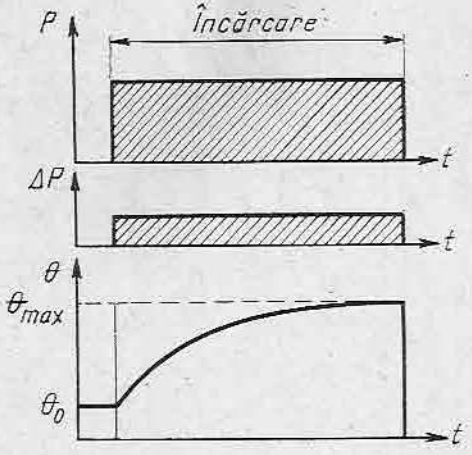


Fig. 14.3. Diagrama regimului de funcționare de lungă durată *RC*.

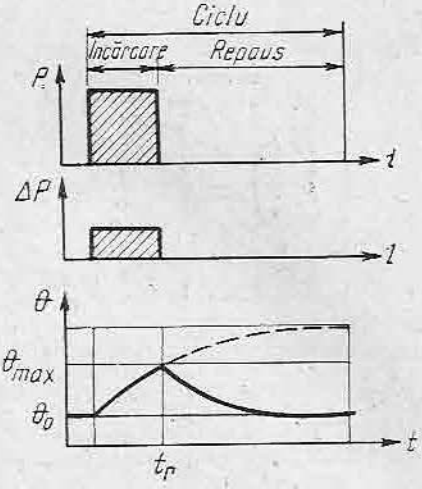


Fig. 14.4. Diagrama regimului de funcționare de scurtă durată *RSD*.

ruciorului și încălzirea puternică determinată de acestea vor conduce la arderea electromotorului.

Din această cauză, una din caracteristicile de bază înscrise pe plăcuța motorului este *regimul nominal de funcționare pentru care a fost construit*.

● **Regimul continuu (de lungă durată) RC** se caracterizează printr-o *funcționare cu o durată suficientă ca echilibrul termic să fie atins*.

În figura 14.3 sînt reprezentate trei diagrame: puterea P, pierderile ΔP, temperatura θ ale motorului în funcție de timp.

Temperatura maximă este atinsă la echilibru, după care motorul funcționează continuu fără ca temperatura să mai crească.

● **Regimul de scurtă durată RSD.** În acest regim, *durata de funcționare la puterea nominală este mai mică decît durata necesară ca echilibrul termic să fie atins*. La timpul t_r (fig. 14.4), motorul se oprește și urmează un repaus suficient de lung ca temperatura inițială θ_0 să fie restabilită.

Se fabrică electromotoare standard pentru durate de funcționare de 10, 30, 60 și 90 min.

● **Regimul intermitent RI** *prezintă cicluri de funcționare care nu depășesc 10 min și care se repetă identic în toate fazele:* încărcare, mers în gol, pornire, frînare și repaus. Pentru simplificare, în figura 14.5 s-a considerat că pornirile nu influențează încălzirea mașinii.

Raportul în procente dintre durata încărcării și durata totală a unui ciclu se numește **durată relativă de lucru** și se notează *DA*.

Se fabrică electromotoare pentru *DA* 15%, 25%, 40%, 60%.

● **Regimul intermitent cu perioadă de pornire RIP,** spre deosebire de *RI, ia în considerare perioada de pornire*. Pornirile solicită o putere sporită și vîrfuri de creștere a temperaturii (fig. 14.6).

Electromotoarele fabricate pentru regim *RIP* au specificat numărul maxim de cicluri admise pe oră: 60, 90, 120, 240, 360, 480 sau 600.

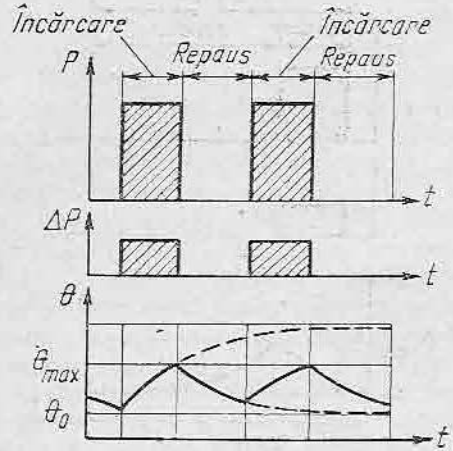


Fig. 14.5. Diagrama regimului de funcționare intermitent *RI*.

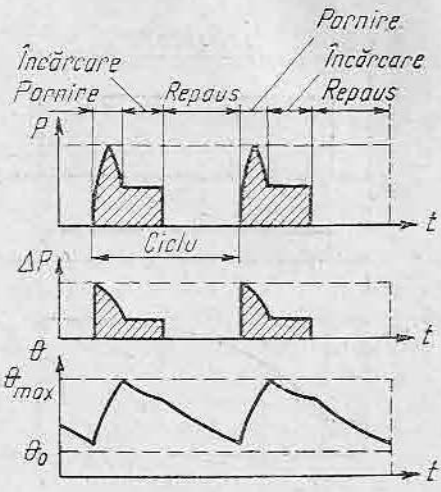


Fig. 14.6. Diagrama regimului de funcționare intermitent cu perioadă de pornire *RIP*.

În afară de numărul de cicluri pe oră, la aceste motoare se precizează și durata relativă de lucru.

● **Regimul intermitent cu perioadă de pornire și de frînare RIPF** *ia în considerare*, în afară de timpul de funcționare *și timpii de pornire și frînare*. Diagramele din figura 14.7 arată că, la frînare, pierderile și creșterea de temperatură pot fi mai importante ca la pornire.

Motoarele fabricate au indicate numărul de cicluri și *DA* identice ca pentru regimul *RIP*.

● **Regimul continuu de încărcare intermitentă RCI** constă dintr-o *succesiune de cicluri în care, după o perioadă de încărcare, motorul continuă să funcționeze, dar în gol*. În acest fel, *echilibrul termic nu poate fi atins* (fig. 14.8).

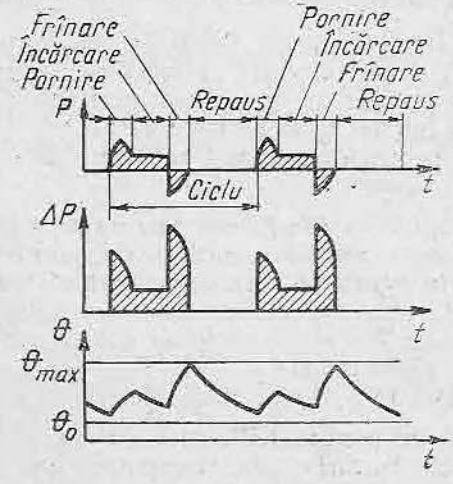


Fig. 14.7. Diagrama regimului de funcționare intermitent cu perioadă de pornire și frînare *RIPF*.

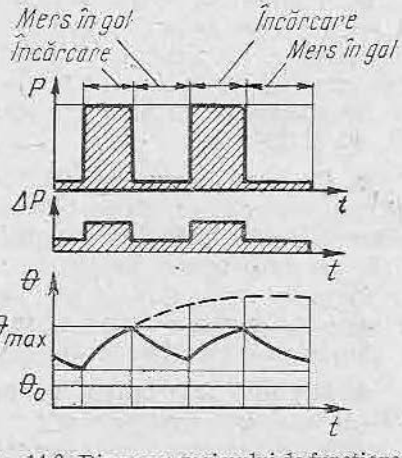


Fig. 14.8. Diagrama regimului de funcționare continuu cu încărcare intermitentă *RCI*.

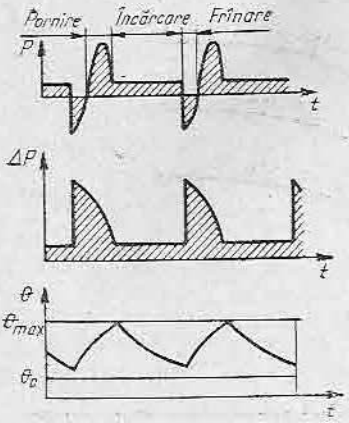


Fig. 14.9. Diagrama regimului continuu cu perioada de pornire și de frînare *RCPF*.

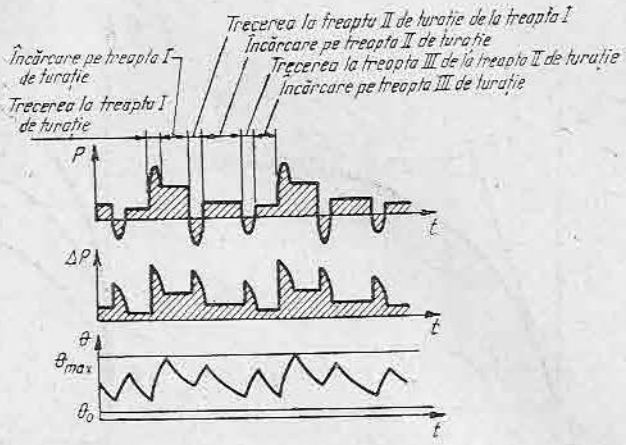


Fig. 14.10. Diagrama regimului continuu cu schimbări periodice de turație *RCSV*.

● **Regimul continuu cu perioadă de pornire și de frînare RCPF,** ilustrat în figura 14.9, *completează regimul RCI cu perioadele de pornire și frînare.*

● **Regimul continuu cu schimbări periodice de turație RCSV** prezintă o *succesiune de cicluri de funcționare identice, compuse fiecare din timpul de funcționare la diferitele trepte de turație luate în considerare.* În figura 14.10 este prezentat un regim *RCSV* cu trei trepte de turație.

C. ALEGEREA ȘI VERIFICAREA MOTORULUI ÎN FUNCȚIE DE ÎNCĂLZIRE

1. ÎNCĂLZIREA MOTORULUI ELECTRIC

Criteriul cel mai important de alegere și verificare a motoarelor de acționare îl constituie încălzirea.

● **Încălzirea motoarelor electrice** este determinată de pierderile de energie. *Pierderile mecanice* sînt produse de frecări în lagăre și de ventilație. *Pierderile în fier* sînt produse de variația fluxului în circuitele magnetice. *Pierderile rezistive* se produc în înfășurări.

Pierderile se transformă în căldură și temperatura părților componente ale motorului se ridică.

La început, căldura produsă de pierderi determină încălzirea motorului. Treptat, o parte din căldură din ce în ce mai mare se transmite mediului înconjurător pînă ce se obține *echilibrul termic.*

● **Echilibrul termic** se consideră atins după încălzirea motorului la valoarea admisibilă, restul căldurii produse transmițîndu-se mediului înconjurător. Practic, se consideră echilibru termic starea în care temperatura diferitelor părți ale motorului nu variază mai mult decît cu 2°C pe oră.

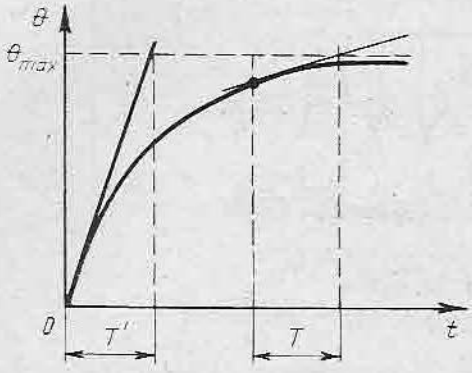


Fig. 14.11. Reprezentarea grafică a ecuației creșterii de temperatură.

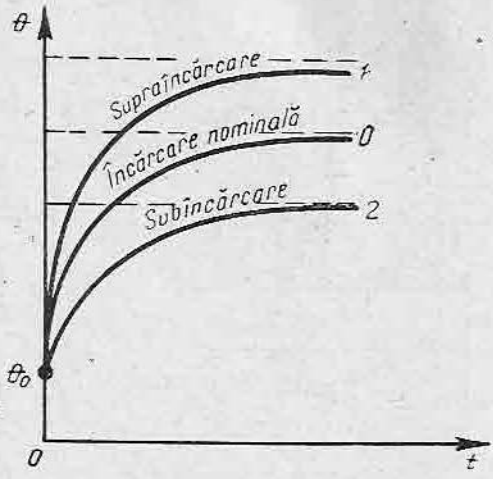


Fig. 14.12. Creșterea de temperatură în funcție de încărcare.

La sarcina constantă P_1, pentru o putere la arborele motorului P_2, cu randamentul η, pierderile ΔP se exprimă prin relația $\Delta P = P_1 - P_2 = P_2 \cdot \frac{1-\eta}{\eta}$.

Cantitatea de căldură degajată în unitatea de timp este: $Q = 0{,}24\, P_2 \frac{1-\eta}{\eta}$, în care 0,24 este coeficientul de transformare kilowatt — calorie mare.

În figura 14.11 este reprezentată grafic ecuația creșterii de temperatură θ în funcție de timp, $\theta = \theta_0(1 - e^{\frac{-t}{T}})$. Echilibrul termic este atins la θ_{max}. T se numește constanta de timp a încălzirii. Tangenta în orice punct al curbei și verticala în același punct determină pe dreapta $\theta = \theta_{max}$ valoarea constantei de timp T.

Echilibrul termic este atins astfel:

— *la mașinile de putere mică* sau cu ventilație forțată, după 2—3 ore;
— *la mașinile cu puteri mijlocii și mari*, după 4—8 ore;
— *la mașinile închise*, după 7—12 ore.

În figura 14.12 s-au reprezentat curbele creșterii de temperatură pentru un motor încărcat normal (curba *0*), peste puterea nominală (curba *1*) și sub puterea nominală (curba *2*), ținîndu-se seama că în situațiile reale creșterea de temperatură începe de la temperatura mediului ambiant θ_0 și nu de la zero. Temperatura mediului ambiant este considerată la valoarea standard de 35°C.

Notă. La alegerea unui motor care lucrează la o temperatură ambiantă diferită de 35°C se are în vedere temperatura maximă admisă de clasa de izolație a materialelor folosite în diferitele părți componente ale motorului.

Observație. Un motor electric care va funcționa la 40 ... 45°C temperatură ambiantă, trebuie să fie încărcat la o putere mai mică decît puterea nominală. Același motor folosit la 20°C va putea fi supraîncărcat *.

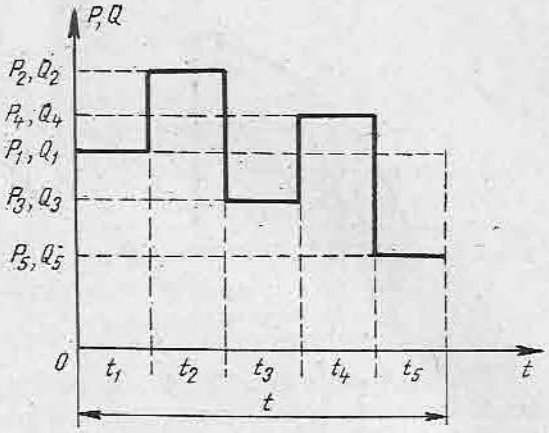


Fig. 14.13. Diagrama de sarcină pentru regim de lucru continuu cu încărcare variabilă în trepte.

2. DETERMINAREA PUTERII MOTORULUI ÎN REGIM DE LUNGĂ DURATĂ (RC) CU SARCINĂ CONSTANTĂ

Într-un asemenea regim lucrează motoarele benzilor transportoare, pompelor, ventilatoarelor.

Se cunosc: cuplul rezistent M_r, raportul transmisiei i și randamentul η.

Se calculează: cuplul nominal $M_n = M_r \frac{1}{i} \cdot \frac{1}{\eta}$ și puterea nominală necesară la turația n_n a motorului $P_n = \frac{M_n n_n}{9\,550}$ în care cuplul este exprimat în Nm.

Se alege din catalog un motor *RC* cu puterea imediat superioară sau egală lui P_n.

3. DETERMINAREA PUTERII MOTORULUI ÎN REGIM DE LUNGĂ DURATĂ (RC) CU SARCINA VARIABILĂ ÎN TREPTE

În regim de lungă durată cu sarcina variabilă în trepte lucrează, de exemplu, motoarele mașinilor-unelte de prelucrare a metalelor (pe parcursul prelucrării apar regimuri de tăiere care încarcă motorul în mod diferit).

În diagrama de sarcină din figura 14.13, motorul electric funcționează pe duratele de timp $t_1 \ldots t_5$, la diferite sarcini $P_1 \ldots P_5$, cărora le corespund pierderile $Q_1 \ldots Q_5$.

Dimensionarea motorului pentru a face față unei încărcări continue la sarcina cea mai mare, de exemplu, P_2, conduce la supradimensionare; în intervalele t_1, t_3, t_4 și t_5 motorul fiind încărcat la puterile P_1, P_3, P_4 și P_5 mai mici decît P_2, înseamnă că va fi folosit nerațional. Dimensionarea motorului pentru a face față unei încărcări continue la P_5 conduce la subdimensionare; motorul va corespunde numai la intervalul t_5 (dacă P_5 este sarcina cea mai mică).

● **Determinarea puterii motorului prin calcul.** Pentru fiecare interval de timp se calculează pierderile de putere ΔP și cantitatea de căldură dezvoltată Q.

* Se observă că pentru o sarcină constantă corespunde un interval de temperatură constant.

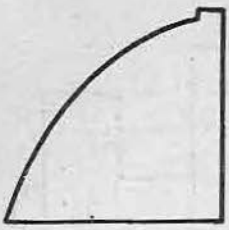


Fig. 14.14. Şablonul pentru determinarea supratemperaturii.

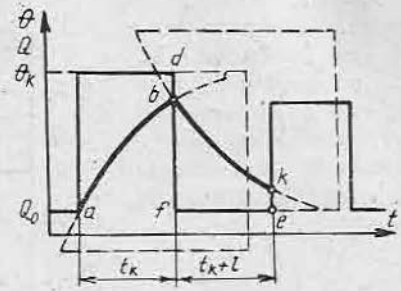


Fig. 14.15. Folosirea şablonului.

Din cantităţile de căldură rezultă supratemperaturile θ care se acumulează începînd de la temperatura mediului ambiant θ_i presupusă zero.

Metoda descrisă este puţin folosită datorită volumului necesar de calcule.

● **Determinarea puterii motorului pe cale grafică.** După cum s-a arătat în § C.1, fiecărui motor îi este caracteristică o *constantă de timp a încălzirii T* şi un timp necesar pentru a ajunge la echilibru termic. Cu aceste date specifice motorului ales, se construieşte un şablon (fig. 14.14), care permite trasarea rapidă a porţiunilor din curba supratemperaturilor *ab*, *bk*, ...

Şablonul foloseşte atît pentru încălzire cît şi pentru răcire, conform indicaţiilor din fig. 14.15 în care t_k este un interval de timp dintr-un ciclu, t_{k+1} intervalul de timp următor, iar θ_k este supratemperatura corespunzătoare lui t_k.

Metoda şablonului se poate folosi optim atunci cînd constanta de timp a maşinii pentru care este întocmit şablonul, are o mărime de acelaşi ordin cu diferite intervale ale diagramei de sarcină.

● **Verificarea încălzirii motorului prin metoda pierderilor echivalente.** Prin această metodă se înlocuieşte diagrama de pierderi în trepte printr-o diagramă de pierderi constante.

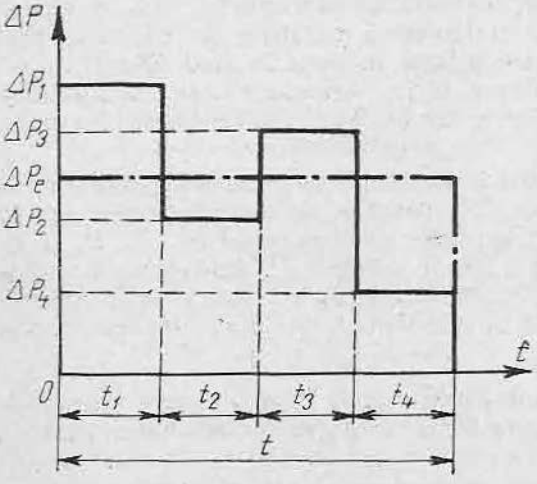


Fig. 14.16. Determinarea pierderilor echivalente.

Fizic, se urmăreşte obţinerea mărimii pierderilor echivalente la o funcţionare cu sarcină constantă.

Matematic, mărimea pierderilor echivalente ΔP_e este suma pierderilor calculate pentru fiecare interval din diagrama de sarcină în trepte:

$$P_e = \frac{\Delta P_1 \cdot t_1 + \Delta P_2 \cdot t_2 + \Delta P_3 \cdot t_3 + \dots}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots}$$

În figura 14.16 este reprezentată curba pierderilor pentru o diagramă de sarcină cu patru trepte $\Delta P_1 \dots \Delta P_4$ şi curba pierderilor echivalente ΔP_e. Conform

relației se însumează suprafețele $\Delta P_1 t_1$, $\Delta P_2 t_2$, $\Delta P_3 t_3$ și $\Delta P_4 t_4$ și prin raportare la t se găsesc ΔP_e — pierderile echivalente.

Se cunosc pierderile ΔP_{nom} ale motorului ales.

Se verifică dacă $\Delta P_e < \Delta P_{nom}$.

Suplimentar se verifică ca pierderile maxime ale ciclului în trepte (ΔP_1) să nu întreacă pierderile maxime indicate de constructorul mașinii.

● **Verificarea încălzirii motorului prin metoda curentului echivalent.** Această metodă este sigură și de aceea este cel mai mult folosită în practică. Raționamentul prin care se lucrează cu curentul echivalent în locul pierderilor echivalente este următorul: dacă se separă pierderile echivalente și suma pierderilor treptelor în constante și variabile:

$$\Delta P_e = \Delta P_e\, const + \Delta P_e\, var;$$

$$\Delta P_1 + \Delta P_2 + \ldots = \Delta P_1 const + \Delta P_1\, var + \Delta P_2\, const + \Delta P_2\, var + \ldots$$

din cele două egalități rezultă:

$$\Delta P_e\, const + \Delta P_e\, var = \Delta P_1\, const + \Delta P_2\, const + \ldots + \Delta P_1\, var + \\ + \Delta P_2\, var + \ldots$$

Toate pierderile constante sînt egale între ele și se reduc, deci pierderile variabile echivalente sînt egale cu suma pierderilor variabile ale treptelor:

$$\Delta P_e\, var = \Delta P_1\, var + \Delta P_2\, var + \ldots$$

Dar pierderile variabile sînt proporționale cu pătratul curentului:

$$\Delta P\, var = kI^2R,$$

deci:

$$I_e^2 = \frac{I^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \ldots}{t_1 + t_2 \ldots}$$

Curentul echivalent este:

$$I_e = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \ldots}{t}}$$

● **Verificarea încălzirii motorului prin metoda cuplului sau puterii echivalente.** Pentru multe utilaje, diagramele în sarcină se cunosc în funcție de cuplurile sau puterile cerute la arborele motor.

Cuplul este proporțional cu fluxul și curentul:

$$M = C_m \Phi I,$$

în care C_m este constanta mecanică a mașinii.

Pentru motoarele asincrone de curent alternativ cu colector și de curent continuu cu excitație separată (constantă), fluxul este constant:

$$M = C'_m I.$$

Cuplul echivalent se obține din relația curentului echivalent, făcînd înlocuirile necesare:

$$M_e = \sqrt{\frac{M_1^2 \cdot t_1 + M_2^2 \cdot t_2 + \dots}{t}}.$$

Metoda cuplului echivalent nu se poate aplica la motoarele de curent continuu cu flux variabil.

Pentru motoarele cu viteza invariabilă, de exemplu cele sincrone, relația dintre putere, cuplu și viteza unghiulară este:

$$P = M \cdot \omega.$$

Puterea echivalentă se obține din relația cuplului echivalent, făcînd înlocuirile necesare:

$$P_e = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_1 + P_2^2 \cdot t_2 + \dots}{t}}.$$

● **Succesiunea operațiilor de alegere și verificare la încălzire a motorului prin metoda cuplului sau a puterii echivalente.** *Determinarea puterii motorului* decurge în următoarea succesiune:

— stabilirea diagramei cuplului motor sau a puterii în funcție de timp;
— alegerea motorului care se verifică;
— calculul cuplului sau a puterii echivalente:
— verificarea cuplului sau a puterii echivalente cu cuplul nominal sau puterea nominală a motorului;
— verificarea acoperirii de către cuplul maxim al motorului ales, a vîrfului de sarcină din diagramă;
— verificarea acoperirii de către cuplul de pornire al motorului ales, a cuplului de pornire al sarcinii;
— verificarea acoperirii de către suprasarcina termică admisibilă a motorului ales, a punctului de încălzire maximă din diagramă.

4. DETERMINAREA PUTERII MOTORULUI ÎN REGIM DE SCURTĂ DURATĂ (RSD)

În regimul de scurtă durată (*RSD*), timpul de funcționare t este astfel limitat încît în timpul de repaus t_0 temperatura revine la valoarea inițială.

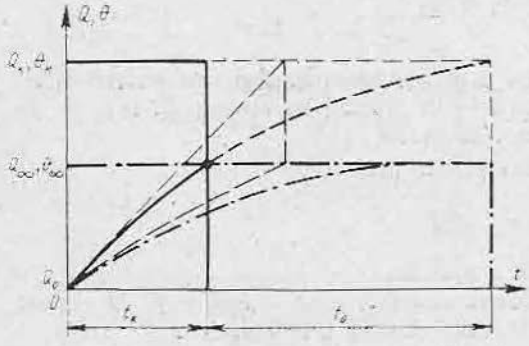


Fig. 14.17. Diagrama pierderilor și supratemperaturilor în *RSD*.

În figura 14.17 este reprezentată diagrama pierderilor Q și a supratemperaturilor θ în *RSD*.

Exemple de motoare care lucrează în *RSD* sînt cele ale polizoarelor, ale dispozitivelor de prindere a pieselor la mașini-unelte, ale plăcilor turnante.

Funcționarea la timpul activ t_k, conduce la încălzirea Q_k și la supratemperatura θ_k. În practică se constată că timpul activ t_k este mai mic decît $3T_a$, unde T_a este

constanta de timp a încălzirii iar t_0 este mai mare decît $4T_0$ (unde T_0 este constanta de timp a răcirii motorului).

Pentru regimul *SD* se pot folosi atît motoare construite pentru *RC*, cît și motoare construite special pentru *RSD* avînd durate de funcționare standard de 10, 30, 60 și 90 min.

● **Determinarea puterii motorului în regim SD, folosind un motor pentru RC.** Din figura 14.17 se poate observa că încălzirea mașinii se oprește după t_k. Alegînd un motor pentru *RC* cu încălzirea Q_∞ și supratemperatura stabilizată la θ_∞, se va determina motorul necesar pentru regimul *SD*. Puterea acestui motor P_∞ corespunzînd încălzirii Q_∞, este mai mică decît P_k.

Pentru motoare sînt caracteristice coeficientul de încărcare mecanic k_m și coeficientul de încărcare termic k_t. Acești coeficienți se obțin prin calcul și se verifică la bancul de probă, în funcție de durata relativă a sarcinii.

Coeficientul de încărcare mecanic depinde de pierderile constante și variabile și, cunoscîndu-l, se poate determina puterea motorului *RC* folosit în regim *SD*:

$$P_\infty = \frac{P_k}{k_m} = \alpha P_k,$$

în care $\alpha < 1$.

Coeficientul de încărcare termic la care trebuie să funcționeze motorul fiind cunoscut, se poate determina intervalul de timp admisibil t_k la care poate fi folosit motorul *RC*:

$$t_k = T \ln \frac{k_t}{k_t - 1}.$$

● **Determinarea puterii motorului în regim SD folosind un motor construit special.** În acest caz, alegerea se face direct din catalog pentru duratele de funcționare cele mai apropiate.

Exemplu: Diagrama de sarcină indică un cuplu rezistent corespunzător puterii de 9 kW pentru o durată de funcționare de 25 min. Se va alege din catalog un motor de 10 kW pentru 30 min.

Succesiunea operațiilor de verificare a motorului în cazul în care caracteristicile necesare diferă de datele de catalog este următoarea:

— cunoscînd sarcina P_k în regim de scurtă durată, se alege un motor cu putere nominală P_n și durata de funcționare admisibilă t_{kn};

— cunoscînd pierderile Q_n și supratemperatura admisibilă θ_n pentru motorul ales, se determină pierderile Q_k pentru sarcina P_k;

— se determină durata de funcționare admisibilă t_k și se compară cu durata de funcționare admisibilă t_{kn} a motorului ales.

Dacă mărimile comparate sînt apropiate sau egale, motorul a fost bine ales; în caz contrar se reiau calculele pentru un alt motor.

5. DETERMINAREA PUTERII MOTORULUI ÎN REGIM INTERMITENT (RI)

În regim intermitent se repetă identic cicluri de cel mult 10 min, în care timpul de funcționare nu permite atingerea echilibrului termic, după cum timpul de repaus nu permite redobîndirea temperaturii inițiale.

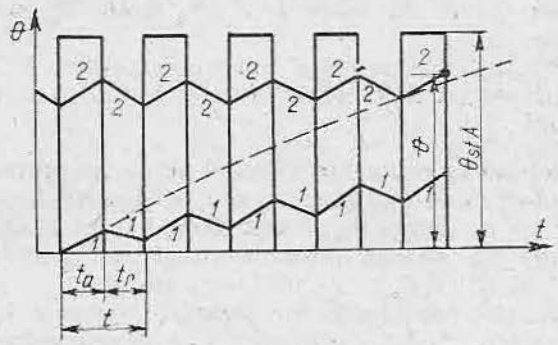


Fig. 14.18. Diagrama ideală de sarcină în regim intermitent.

Durata relativă de lucru este standardizată pentru 15, 25, 40 sau 60%.

Exemple de motoare care lucrează în regim intermitent sînt cele ale mașinilor de ridicat, mașinilor-unelte, excavatoarelor etc.

În figura 14.18 este reprezentată o diagramă ideală de sarcină în *RI*.

Pe curba *1*, pornind de la temperatura mediului ambiant, se observă creșterea supratemperaturii θ pînă la echilibru. Pe curba *2* se observă oscilația supratemperaturii între θ_{max} pe durata de încărcare t_a și θ_{min} pe durata repausului t_r.

Supratemperatura maximă θ_{stA} s-ar obține lucrînd în regim continuu cu puterea P_∞ și Q_∞.

În acest fel se poate determina o echivalență între o sarcină în regim intermitent și una în regim continuu.

Legătura dintre supratemperaturile maxime θ_{stA} și θ_{max} este dată de relația:

$$\theta_{stA} = \theta_{max}\left(1 + \frac{t_0}{t_a}\cdot\frac{T_0}{T}\right) = \theta_{max}\left(1 + \frac{1}{\beta}\frac{t_0}{t_a}\right).$$

Raportul constantelor de timp a încălzirii și răcirii se numește *factorul de corecție pentru răcire* și este subunitar:

$$\beta = \frac{T_0}{T} < 1.$$

● **Determinarea duratei active relative de lucru.** În diagrama reală de sarcină intermitentă (fig. 14.19), ciclul integral este t_c. Durata t_c este mai mică decît 10 min.

Numărul de conectări pe oră h în *RI* poate atinge ordinul sutelor:

$$h = \frac{3\,600}{t_a + t_0}.$$

Timpul de lucru t_a însumează toți timpii de încărcare, iar t_0, toți timpii de repaus:

$$t_a = t_a' + t_a'' + t_a'''$$

$$t_0 = t_0' + t_0'' + t_0'''$$

Durata activă relativă de lucru este exprimată prin relația

$$DA\% = \frac{t_a}{t_a + t_0}\,100 = \frac{t_a}{t_c}\,100.$$

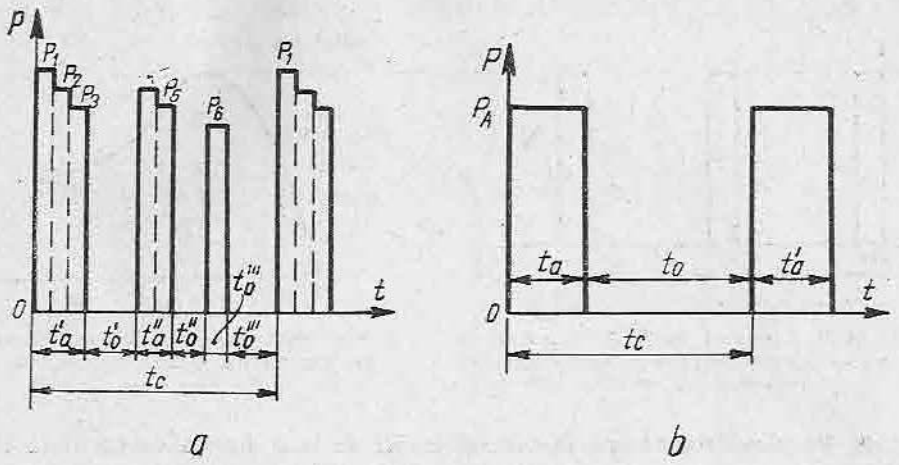


Fig. 14.19. Diagrama de sarcină:
a — reală; *b* — transpusă.

Din diagrama reală din figura 14.19, *a*, rezultă:

$$DA\% = \frac{t'_a + t''_a + t'''_a}{t'_a + t''_a + t'''_a + t'_0 + t''_0 + t'''_0} \times 100.$$

În repaus, condițiile de răcire ale motorului se înrăutățesc.

Durata activă relativă de lucru corectată cuprinde factorul de corecție pentru răcire:

$$DA\% = \frac{t_a}{t_a + \beta t_0} \times 100.$$

● **Echivalarea sarcinii intermitente cu o sarcină permanentă.** Diagrama reală din figura 14.19, *a* se poate transpune în diagrama ideală de sarcină din figura 14.19, *b*.

Sarcina echivalentă P_A se calculează prin metoda mărimilor echivalente:

$$P_A = \sqrt{\frac{P_1^2 t'_{a1} + P_2^2 t'_{a2} + \ldots P_6^2 t'''_a}{t'_a + t''_a + t'''_a}}.$$

Ca și în regimul *SD* (v. § C4) puterea echivalentă P_∞ a unui motor *RC* se obține cunoscînd coeficientul de încărcare mecanică k_m:

$$P_\infty = \frac{P_A}{k_m}.$$

În figura 14.20 este reprezentată variația coeficientului de încărcare mecanică în funcție de durata activă relativă de lucru corectată.

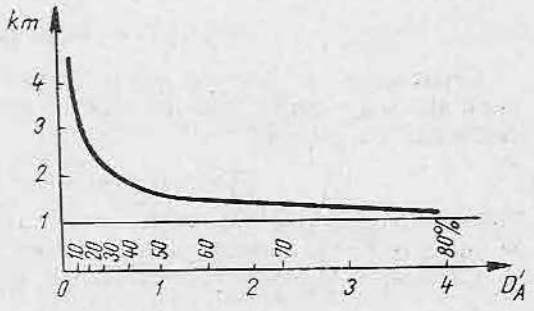


Fig. 14.20. Variația coeficientului de încărcare mecanică în funcție de durata relativă de lucru corectată.

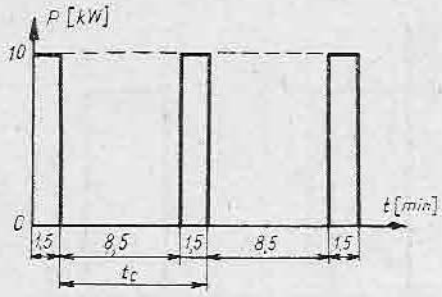


Fig. 14.21. Diagrama ideală de funcționare în regim intermitent pentru un motor de 10 kW și DA de 15%.

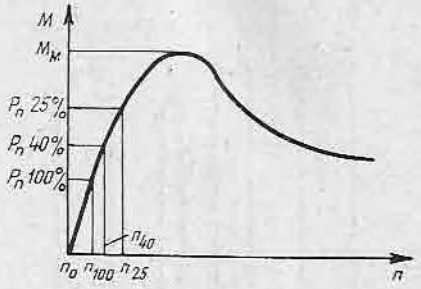


Fig. 14.22. Puterile și vitezele nominale pentru diferite durate relative de conectare.

● **Recalcularea puterii motorului în RI de la o durată de lucru la alta.** În § C5 s-a arătat că sarcina *RI* poate fi recalculată astfel ca un motor *RC* să o poată prelua.

Practic, motoarele speciale construite pentru *RI* prezintă următoarele particularități mecanice deosebite, pentru a face față solicitărilor puternice:

— diametrul axului mărit;
— fixarea întărită a înfășurării;
— momentul de inerție redus;
— dimensionarea mai largă a periilor și inelelor colectoare.

Alegerea motorului pentru *RI* se face din catalog pentru valorile caracteristice cele mai apropiate.

În figura 14.21 este dată diagrama ideală de funcționare în regim intermitent pentru un motor de 10 kW și DA 15%.

Puterea nominală, turația și capacitatea de supraîncărcare ale aceluiași motor diferă după modul în care este folosit. Privind caracteristica naturală a motorului din figura 14.22 care rămîne neschimbată, se pot desprinde următoarele observații:

Puterea nominală scade invers proporțional cu durata activă relativă de lucru:

$$(P_n)_{60} < (P_n)_{40} < (P_n)_{25} < (P_n)_{15}.$$

Turațiile nominale sînt în raport direct cu duratele de acționare:

$$(n_n)_{15} < (n_n)_{25} < (n_n)_{40} < (n_n)_{60}.$$

Capacitatea de supraîncărcare crește cu DA durata relativă activă de lucru deoarece cuplul maxim rămîne neschimbat în timp ce cuplul nominal scade cu puterea:

$$(M_n)_{15} < (M_n)_{25} < (M_n)_{40} < (M_n)_{60}.$$

Cunoscînd caracteristicile unui motor cu puterea P_1 și durata de lucru DA_1 se poate recalcula puterea acestui motor P_2, pentru o durată de lucru DA_2.

Calculul se bazează pe echivalarea pierderilor:

$$Q_{15}t_{15} = Q_{25}t_{25} = Q_{40}t_{40} = Q_{60}t_{60},$$

t_{15}, t_{25}, t_{40} și t_{60} sînt duratele efective de conectare în minute.

Observație: durata unui ciclu în *RI* fiind de 10 min, $t_{15} = 1{,}5$ min, $t_{25} = 2{,}5$ min, $t_{40} = 4$ min, $t_{60} = 6$ min.

Pierderile fiind proporționale cu pătratul curenților relația de mai sus se poate scrie astfel:

$$I_{15}^2 t_{15} = I_{25}^2 t_{25} = I_{40}^2 t_{40} = I_{60}^2 t_{60}.$$

Considerînd proporționalitatea dintre putere și curent, o altă formă de echivalență, dar între puteri este:

$$P_{15}^2 t_{15} = P_{25}^2 t_{25} = P_{40}^2 t_{40} = P_{60}^2 t_{60}.$$

În cazul general:

$$P_{DA_2} = P_{DA_1} \cdot \sqrt{\frac{DA_1}{DA_2}}.$$

În practică se corectează relația de recalculare cu un factor constructiv indicat în tabelul 14.1

$$P_{DA_2} = K P_{DA_1} \sqrt{\frac{DA_1}{DA_2}}.$$

Tabelul 14.1

Valorile factorului de corecție $K = f(DA\%)$

Tipul motorului		$DA\%$				
		15	20	25	30	40
Asincron	închis	1,04	1,30	1,0	0,99	0,93
	deschis	1,01	1,01	1,0	0,98	0,96
Serie c.c.	închis	1,01	1,05	1,0	0,99	0,94
	deschis	0,85	0,95	1,0	1,05	1,15

Exemplu. Un motor asincron închis de 10 kW cu *DA* 40% urmînd a fi folosit pentru *DA* 15% va avea puterea recalculată:

$$P_{15} = 1{,}04 \cdot 10 \sqrt{\frac{4}{1{,}5}} = 17 \text{ kW}.$$

6. DETERMINAREA PUTERII MOTORULUI PENTRU ACȚIONĂRI ELECTRICE CU VOLANT

Exemple: prese mecanice, mașini de ștanțat, ciocane de forjă.

Volantul acumulează energie cinetică cînd sarcina este redusă și o cedează cînd apar vîrfuri de sarcină.

Șocurile de sarcină preluate de motor se aplatisează.

Puterea aleasă pentru motor la o acționare cu volant este redusă față de aceeași acționare, dar fără volant.

Volantul poate fi prevăzut de asemenea pentru a uniformiza viteza și pentru reducerea oscilațiilor proprii ale rotorului motorului.

Pentru acumulare și cedare de energie cinetică, motorul trebuie să aibă o caracteristică suplă (motoarele de curent continuu cu înfășurare serie sau

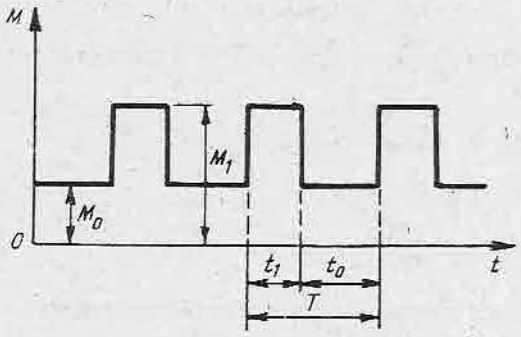


Fig. 14.23. Detaliu din diagrama de sarcină cu șocuri.

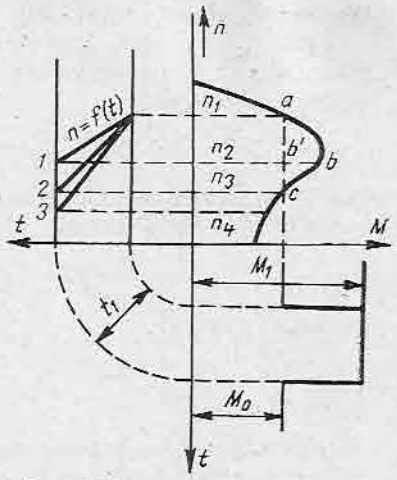


Fig. 14.24. Analiza stabilității unei acționări cu volant.

compund, motoarele asincrone cu rotor bobinat și rezistență rotorică și motoarele asincrone în scurtcircuit cu alunecare mărită).

În figura 14.23 se reprezintă trei cicluri dintr-o diagramă de sarcină cu șocuri; fiecare ciclu este format dintr-un vîrf M_1 pe durata t_1, urmat de mersul în gol M_0 pe durata t_0.

În figura 14.24 s-au reprezentat: în cadranul I — caracteristica mecanică a unui motor asincron, în cadranul IV — diagrama de sarcină pe care trebuie s-o preia, iar în cadranul II — diagramele $n = f(t)$ pentru trei situații de lucru.

Observații:

— la apariția șocului de sarcină de la M_0 la M_1, viteza se reduce de la n_1 la n_2, pe caracteristica $n = f(t)$ — 1, deoarece cuplul motorului M este mai mic decît M_1; intervalul de timp în care se face reducerea de viteză este t_1 (durata șocului);

— revenirea de la M_1 la M_0 lasă motorului o rezervă de cuplu $b'b$, care permite revenirea turației pînă la n_1 (pe aceeași caracteristică 1);

— în cazul în care caracteristica $n = f(t)$ aleasă ar fi 3, căderea de viteză pînă la n_4 nu lasă motorului rezerva de cuplu necesară și mecanismul se va opri.

Durata relativă a șocului de sarcină τ este determinată de raportul:

$$\tau = \frac{t_1}{2T}.$$

Momentul de volant raportat la arborele motorului pentru a prelua vîrfurile de sarcină se calculează cu relația:

$$GD = \frac{t}{2\tau} \frac{375 \cdot M_n}{n_0 \cdot s_n},$$

în care M_n este cuplul nominal, s_n alunecarea nominală și n_0 turația sincronă.

Ordinea de desfășurare a verificării unui motor la o acționare cu volant este următoarea:

— se alege un motor avînd cuplul nominal superior valorii cuplului la mers în gol $M_n > M_0$;

— se calculează cuplul critic al motorului ales $M_k = \lambda M_n$;

— se calculează raportul între cuplul la mers în gol și cuplul critic M_0/M_k;

— se calculează durata relativă a șocului de sarcină τ;

— se găsește în tabelul 14.2 raportul M_1/M_k în funcție de τ și de M_0/M_k;

— se calculează din raportul M_1/M_k valoarea cuplului M_1, care trebuie să fie mai mare sau cel puțin egală cu valoarea șocului maxim din diagramă.

Tabelul 14.2

Raportul M_1/M_k în funcție de τ și de M_0/M_k

τ \ M_0/M_k	M_1/M_k			
	0	0,2	0,5	0,8
0,1	11	10	7,5	4,75
0,2	2	4,2	4,2	3,25
0,3	4	3,75	3,2	2,5
0,4	3,2	2	2,65	2,15
0,5	2,7	2,5	2,3	1,8
0,7	2,2	2	1,8	1,6
1	1,8	1,7	1,6	1,35
1,5	1,5	1,35	1,32	1,25
2	1,35	1,25	1,23	1,18
2,5	1,26	1,24	1,2	1,15
3	1,24	1,22	1,18	1,12

D. ALEGEREA TIPULUI CONSTRUCTIV AL MOTORULUI

Condițiile de lucru diferite impuse de mediul în care se desfășoară procesele de fabricație au determinat construirea unor game foarte largi de tipuri de motoare care diferă din punctul de vedere al *gradului de protecție*.

Execuția motoarelor protejate este legată de cheltuieli suplimentare; de aceea este rațional ca motorul ales să corespundă gradului de protecție solicitat de mediul ambiant.

● **Gradele nominale de protecție contra pătrunderii corpurilor străine și a lichidelor** sînt stabilite în standardele 5325-70 și 625-71 și reproduse în tabelul 14.3. Motoarele sînt notate cu literele *IP*, urmate de două cifre caracteristice.

Prima cifră caracteristică indică protecția contra atingerilor și pătrunderii corpurilor străine, în felul următor:

1 — protecția contra atingerii întîmplătoare cu o mare suprafață a corpului omenesc și contra pătrunderii unor corpuri solide cu un diametru mai mare de 50 mm;

2 — protecția contra atingerii cu degetele și a pătrunderii corpurilor cu diametrul peste 12,5 mm;

3 — protecția împotriva atingerii cu unelte și alte obiecte similare de dimensiuni mici, în general împotriva pătrunderii corpurilor străine cu diametrul de peste 2,5 mm;

4 — protecția împotriva atingerii cu unelte sau alte obiecte similare de dimensiuni mici, în general împotriva pătrunderii corpurilor străine cu diametrul peste 1 mm;

5 — protecția contra atingerilor cu orice fel de mijloace și parțial împotriva prafului;

6 — protecția totală contra prafului.

Tabelul 14.3

Gradele nominale de protecție contra pătrunderii corpurilor străine și a lichidelor.

Simbol literal	Prima cifră caracteristică (protecția contra atingerilor și a pătrunderilor corpurilor străine)	A doua cifră caracteristică (protecția contra pătrunderii lichidelor)								
		0	1	2	3	4	5	6	7	8
IP	0	IP00								
	1		IP11	IP12	IP13					
	2			IP22	IP23					
	3				IP33					
	4					IP44				
	5					IP54	IP55			
	6							IP66	IP67	

A doua cifră caracteristică se referă la protecția contra pătrunderii lichidelor și poate avea următoarele semnificații:

0 — fără protecție; nu este împiedicată pătrunderea lichidelor;

1 — protecția contra picăturilor de apă provenite din condens;

2 — protecția contra picăturilor care cad pe direcția verticală;

3 — protecția contra ploii considerate ca picături care cad sub unghiuri de maximum 45° față de verticală;

4 — protecția contra stropilor de picături din orice direcție;

5 — protecția contra stropilor sub formă de jet din orice direcție;

6 — protecția contra condițiilor existente pe puntea navelor;

7 — protecția contra pătrunderii apei la scufundare într-un lichid;

8 — protecția contra pătrunderii apei la scufundare într-un lichid sub presiune.

Exemple. *Un motor IP00* (tabelul 14.3) este *deschis fără protecție.* Astfel de motoare nu se pot instala decît în încăperile industriale foarte curate, uscate și unde nu este permis decît accesul unui personal instruit.

Un motor IP33 nu permite atingerea părților sub tensiune cu scule avînd diametrul mai mare de 2,5 mm (3) și nu permite pătrunderea stropilor sub un unghi mai mare de 45° (3).

Ansamblul IP44 + IP54. Pentru anumite scopuri, cum sînt linilie de ciment, se execută motoare *IP44*, cu protecție *IP54* la lagăre și cutia de borne.

Cu motoare IP67 sînt echipate pompele de adîncime.

Observație. Cu cît gradul de protecție este mai ridicat, cu atît gabaritul și costul sînt mai ridicate. Din această cauză, se caută variante de amplasare exterioară, sau protecție locală, care să permită soluțiile cele mai economice.

În mediile cu agenți corosivi, se folosesc motoare speciale de construcție complet închisă, cu ventilație proprie sau exterioară.

O problemă deosebită o constituie mediile cu atmosferă explozivă. În minele de cărbuni și alte sectoare industriale, în funcție de condițiile locale și de exploatare, este posibilă formarea unor amestecuri explozive de gaze, vapori, ceață sau praf, împreună cu aerul atmosferic, în cantitate suficientă încît să prezinte pericol.

Standardul 6877/1 ... 6877/10 — 73 se referă la condițiile tehnice generale de calitate pentru echipamente destinate să funcționeze în atmosferă explozivă.

După domeniile de destinație sînt stabilite două grupe de echipamente electrice:

Grupa I — echipamente cu protecție antigrizutoasă, simbolizate Ex I;

Grupa II — echipamente cu protecție antiexplozivă, simbolizate Ex II.

Grupa II se subdivide în funcție de caracteristicile substanțelor care generează atmosfera explozivă și în funcție de temperatura maximă de suprafață admisă. Subgrupele determinate de caracteristicile substanțelor se diferențiază pe baza interstițiului maxim admis în construcțiile capsulate antideflagrante:

II A — 0,5 mm; II B — 0,3 mm; II C — 0,2 mm.

Subgrupele determinate de temperatura maximă de suprafață sînt:

T1 — 450°C; T2 — 300°C; T3 — 200°C; T4 — 135°C; T5 — 100°C;

T6 — 85°C.

Pentru echipamentele electrice destinate să lucreze în locuri în care se depune praf de cărbune, se ia în considerare temperatura de mocnire care limitează temperatura maximă de suprafață la 200°C (T3).

● **Modul de protecție** reprezintă ansamblul măsurilor specifice aplicate unui echipament electric pentru împiedicarea aprinderii atmosferei explozive ambiante.

Echipamentele electrice se realizează cu următoarele moduri de protecție:

d — *capsulare antideflagrantă.* Carcasa echipamentului este capabilă să suporte o explozie internă datorată pătrunderii în interior a unui amestec exploziv, prin îmbinări sau alte căi de trecere.

Aparatul nu suferă avarii și nu transmite explozia în atmosfera înconjurătoare.

p — *capsulare presurizată.* Părțile periculoase ale echipamentului electric sînt amplasate într-o carcasă în care atmosfera explozivă este prevenită și

exclusă de prezența unei atmosfere protectoare presurizate (de exemplu prin ventilație forțată cu aer proaspăt sau gaze inerte).

i — *siguranță intrinsecă.* Un circuit electric se definește ca avînd siguranță intrinsecă atunci cînd aprinderea atmosferei explozive prin scîntei sau efect termic este exclusă, atît la funcționare normală cît și în condiții de defect.

q — *înglobare în nisip.* Arcul electric și efectul termic sînt neutralizate din punct de vedere al aprinderii atmosferei explozive, prin înglobarea părților periculoase ale echipamentului electric în nisip.

o — *imersiune în ulei.* Părțile periculoase ale echipamentului electric sînt imersate în ulei, astfel încît arcul electric, scînteile sau gazul fierbinte formate sub ulei, nu pot aprinde atmosfera explozivă de la suprafața uleiului.

e — *siguranță mărită.* La echipamentele electrice care în mod normal funcționează fără încălziri excesive, arcuri și scîntei, în interiorul carcaselor se iau măsuri suplimentare față de cele adoptate în practica industrială obișnuită, în vederea obținerii unei securități sporite;

s — *mod special.* Aprinderea atmosferei explozive este împiedicată prin alte măsuri decît cele definite în celelalte moduri.

Din exemplele care urmează, rezultă ordinea înscrierii simbolurilor, așa cum sînt gravate pe etichetele echipamentelor electrice.

Ex d II A T3 — protecție antiexplozivă, capsulare antideflagrantă, subgrupa II A, clasa de temperatură T3;

Ex p II T5 — protecție antiexplozivă, capsulare presurizată, grupa II, clasa de temperatură T5;

Ex o II T2 — protecție antiexplozivă, imersiune în ulei, grupa II, clasa de temperatură T2;

Ex d I/II B T3 — protecție antigrizutoasă și antiexplozivă, capsulare antideflagrantă, grupa I și II subgrupa B, clasa de temperatură T3.

Trebuie remarcat că protecția împotriva exploziilor nu asigură implicit și protecția normală împotriva atingerilor, pătrunderii corpurilor străine și a lichidelor.

Se fabrică echipamente electrice cu o bună protecție antiexplozivă și un grad de protecție normal.

Simbolizarea aparatajului electric în construcție explozivă este identică cu aceea pentru mașinile electrice.

REZUMAT

● Tipul electromotorului de acționare ales este impus de caracteristica mecanică a mașinii de lucru.

● Motoarele electrice se construiesc pentru regimuri nominale de funcționare care țin seama de modul în care este atins echilibrul termic.

● Alegerea și verificarea motorului electric se face în funcție de încălzire. Metodele de verificare se bazează pe calculul pierderilor, curentului, cuplului sau puterii echivalente și compararea acestora cu parametrii nominali respectivi ai motorului electric ales.

● Alte verificări obligatorii pentru motorul ales sînt: acoperirea vîrfului de sarcină maximă, asigurarea cuplului de pornire și supradimensionarea pentru încălzirea maximă.

● În regim intermitent se calculează durata relativă de lucru, alegîndu-se motorul electric cel mai apropiat. Duratele relative de lucru standardizate sînt 15, 25, 40 și 60%.

● Volantul se folosește pentru acționările electrice cu șocuri de sarcină, permițînd alegerea unui motor mai mic (decît motorul necesar aceleiași acționări dar fără volant).

● În funcție de mediul în care se desfășoară procesele de fabricație motoarele se aleg ținîndu-se seama de gradul de protecție necesar împotriva pătrunderii prafului și apei. Pentru medii explozive se aleg motoare în execuție antiexplozivă.

VERIFICAREA CUNOȘTINȚELOR

1. Un motor construit pentru o durată de funcționare de 90 min este un motor pentru:

a — *RC*;
b — *RSD*;
c — *RI*?

2. În figura 14.25 este reprezentată o diagramă pentru un regim de funcționare cu cicluri de 8 min.

Durata de acționare a motorului ales pentru o astfel de caracteristică va fi de:
a — 60%; b — 40%; c — 15%?

3. În figura 14.26 curba I reprezintă creșterea de temperatură pentru motorul unui mecanism.

S-a ales un motor căruia la sarcină nominală îi corespunde curba II.
Motorul ales este:

a — subdimensionat;
b — supradimensionat;
c — ales corect.

4. Să se calculeze cantitatea de căldură degajată în unitatea de timp de un electromotor de 10 kW, cu randamentul 0,8.

5. După cîte ore de funcționare în sarcină un electromotor cu puterea de 75 kW (mijlociu) își atinge echilibrul termic (temperatura atinsă rămîne stabilă)?

a — după 2—3 ore;
b — după 4—8 ore;
c — după 1 oră.

6. Condițiile de funcționare pentru un utilaj echipat cu electromotor corespund temperaturii ambiante a unei hale de fabricație *A* în care se măsoară 38°C. Același utilaj este montat și într-o altă hală de fabricație *B* în care temperatura ambiantă nu depășește 30°C.

Care dintre electromotoare poate fi supraîncărcat?

a — cel aflat în hala *A*;
b — cel aflat în hala *B*;
c — amîndouă la fel.

7. Care este cuplul unui electromotor de 10 kW și 1 500 rot/min?

8. Electromotorul din întrebarea 7 este montat pe un utilaj avînd raportul transmisiei $i = 5$ și randamentul 0,7. Care este valoarea cuplului rezistent al acestui utilaj?

9. Să se calculeze puterea echivalentă pentru diagramă de sarcină din figura 14.27.

10. Să se calculeze cuplul echivalent pentru diagrama de sarcină din figura 14.27.

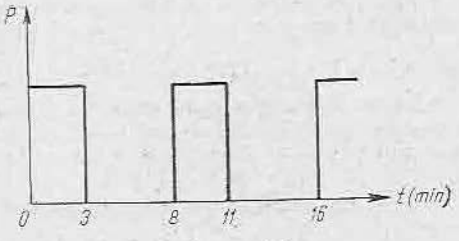


Fig. 14.25.

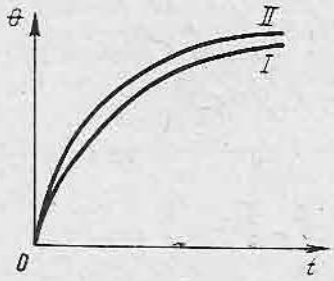


Fig. 14.26.

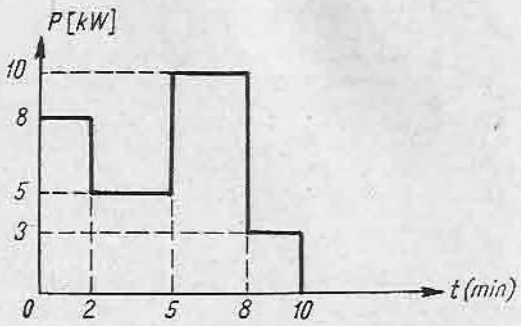


Fig. 14.27.

11. Care este mărimea practică a raportului dintre timpul de funcționare activ t_k și constanta de timp a încălzirii T_a?

a — < 3; b — < 2; c — > 4.

12. Care este mărimea practică a raportului dintre timpul de repaus t_0 și constanta de timp a răcirii T_0?

a — > 4; b — > 3; c — < 1.

13. Să se calculeze numărul conectărilor pe oră admisibil la un motor asincron în scurt-circuit pentru *RI*, pentru un ciclu cu $t_a = 8$ s și $t_0 = 2$ s.

14. În ce raport se află puterea nominală cu durata activă, relativă la lucru?

a — direct proporțional;
b — invers proporțional;
c — nu există nici un raport.

15. Să se calculeze puterea unui electromotor de 10 kW cu *DA* 40% pentru *DA* 15%.

16. O acționare cu electromotor și volant a unei mașini de lucru, este înlocuită printr-o acționare cu electromotor (dar fără volant). Cum va fi puterea noului electromotor ales?

a — mai mică decît prima putere, deoarece nu va mai avea de mișcat sarcina suplimentară a volantului;

b — mai mare decît prima putere, deoarece trebuie să acopere vîrfurile de sarcină ale diagramei de funcționare;

c — egală cu prima putere, deoarece volantul restituie energia acumulată și nu este un consumator propriu-zis.

17. Se cere să se aleagă un electromotor care să aibă o protecție contra atingerilor cu orice fel de mijloace și parțial împotriva prafului precum și contra stropirilor cu picături din orice direcție.

Care este gradul de protecție contra pătrunderii corpurilor străine și a lichidelor conform STAS 5325-70?

a — IP43; b — IP54; c — IP23.

18. Să se aleagă simbolul protecției pentru un electromotor care lucrează în mediu exploziv. Carcasa electromotorului suportă o explozie interioară, fără deteriorarea sau transmiterea exploziei. Interstițiile admise sînt de 0,3 mm. Temperatura maximă de suprafață admisă este de 200°C.

Care este simbolul protecției antiexplozive?

a — Ex. d II B T3; *b* — Ex. o II C T2; *c* — Ex. d T4.

Capitolul 15

ACȚIONĂRI CU GRUPURI DE MAȘINI

Grupurile de mașini sînt utilizate:

— pentru obținerea unor reglaje de viteză cu caracteristici superioare din punctul de vedere al gamei de reglare, precizie etc.;

— pentru obținerea unor caracteristici mecanice de o anumită formă;

— pentru realizarea unor sisteme de transmisie sincronă.

Avînd în vedere frecvența utilizării în practică a acestor grupuri, precum și tendințele de modernizare sau dispariție a acestora, acționările cu grupuri de mașini sînt tratate diferențiat în acest manual.

Astfel, grupul generator-motor, utilizat încă destul de frecvent în acționările electrice și cu tendințe de modernizare prin utilizarea redresoarelor comandate pentru comanda excitației, este tratat pe larg în capitolul 12.

În cele ce urmează se va descrie pe scurt principiul de funcționare al altor grupuri de mașini:

— cuplarea în cascadă a motoarelor asincrone;

— cuplarea pe același arbore a două mașini, una funcționînd în regim de motor, iar cealaltă în regim de generator;

— arborele electric cu mașini asincrone.

Întrucît sînt mai multe tipuri de cuplare în cascadă a motoarelor asincrone și utilizarea lor este din ce în ce mai puțin frecventă, se va trata în cele ce urmează numai cascada Krämer.

În figura 15.1 este reprezentată cascada Krämer formată din trei mașini:

— motorul asincron *MA* care antrenează mașina de lucru;

— motorul de curent continuu *M* cuplat pe același arbore cu motorul asincron;

— comutatricea *C* care transformă energia alternativă de alunecare în energie de curent continuu.

Pornirea și varierea vitezei grupului se realizează astfel:

— se cuplează circuitul statoric al motorului asincron *MA* la rețea și circuitul rotoric la un reostat de pornire care nu a fost reprezentat în figură;

— se lasă neexcitate motorul de curent continuu *M* și comutatricea *C*;

— motorul *MA* accelerează și ajunge pînă la viteza sa nominală, apropiată de viteza sincronă;

— se excită comutatricea și motorul *M* de la o excitatrice separată, nereprezentată în figură și se comută circuitul rotoric al motorului *MA* de pe reostatul de pornire pe comutatrice;

— comutatricea începe să se rotească la viteză corespunzătoa-

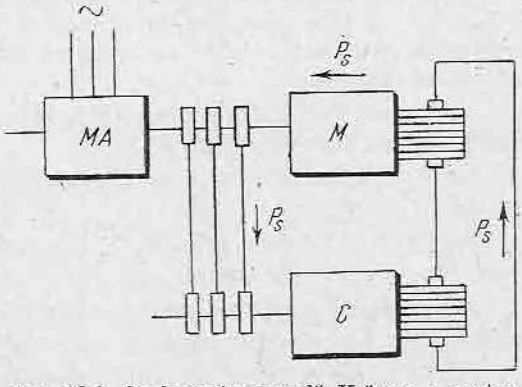


Fig. 15.1. Cuplarea în cascadă Krämer a motoarelor asincrone.

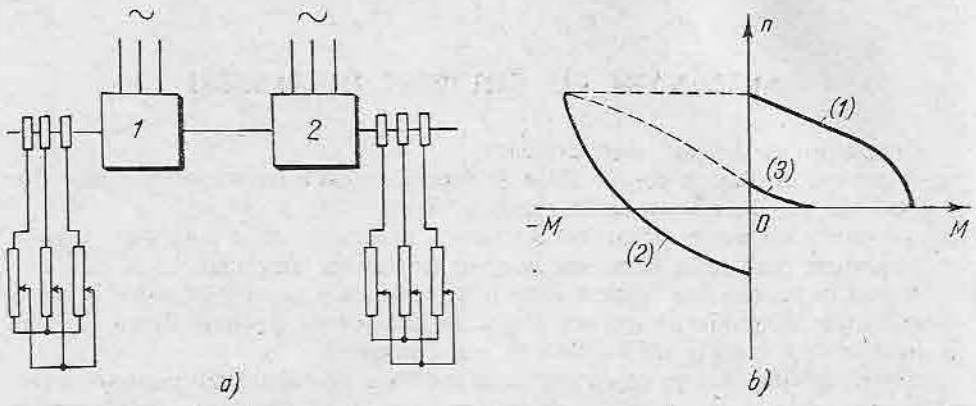


Fig. 15.2. Cuplarea pe același arbore a două mașini asincrone pentru asigurarea stabilității la viteză de rotație redusă:
a — schema cuplării celor două mașini ; *b* — caracteristicile mecanice.

re frecvenței de alunecare $f_2 = f_1 s$ și transmite motorului M cantitatea de energie corespunzătoare;

— prin modificarea curentului de excitație al motorului M se poate obține viteza dorită la arborele motorului MA.

În concluzie se precizează următoarele:

— pornirea se face cu reostat de pornire în care se pierde energia de alunecare;

— funcționarea la diferite viteze se face prin recuperarea energiei de alunecare, deoarece aceasta este preluată de comutatrice și livrată motorului M;

— modificarea curentului de excitație al motorului M duce la modificarea forței contraelectromotoare a acestuia, deci a curentului din circuitul comutatrice-motor M și la modificarea corespunzătoare a curentului din circuitul rotoric al motorului MA, ceea ce are ca efect modificarea turației grupului.

În figura 15.2, *a* este reprezentată cuplarea pe același arbore a două mașini asincrone, dintre care una funcționează în regim de motor, iar cealaltă în regim de generator. Acest grup de mașini asigură funcționarea stabilă la o viteză redusă.

În figura 15.2,*b* sînt reprezentate caracteristicile mecanice *1* și *2* ale celor două mașini și rezultanta lor *3*.

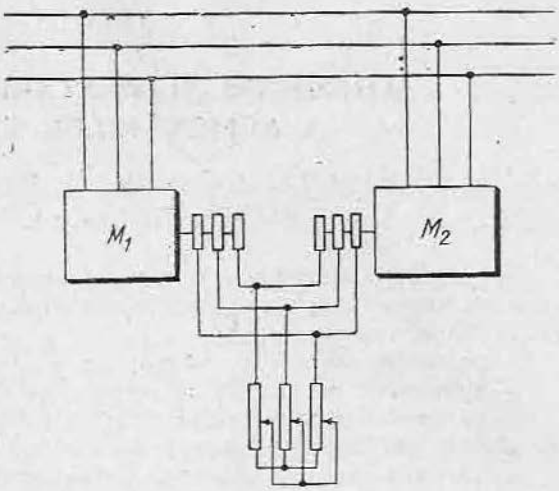
Caracteristica mecanică rezultantă este suficient de rigidă pentru viteze mici.

În figura 15.3 este reprezentată schema unui arbore electric cu motoare asincrone cu reostat comun.

Acest sistem permite sincronizarea vitezelor de rotație a două motoare asincrone, care nu sînt cuplate mecanic între ele.

Condiția ca sistemul să funcționeze în regim normal, este ca parametrii ambelor motoare să fie identici.

Fig. 15.3. Arborele electric cu motoare asincrone cu reostat comun.



Dacă unghiul de decalaj $\theta = 0$, atunci curenții care circulă prin rotoarele celor două mașini sînt egali și suma acestor curenți circulă prin reostatul comun. Dacă încărcările celor două motoare nu sînt egale, atunci curentul egalizator care ia naștere circulă direct între cele două circuite rotorice, în afara reostatului.

Cuplul fiecărui motor poate fi primit ca suma dintre cuplul nominal și cuplul egalizator.

Dacă apare deci un unghi de decalaj $\theta > 0$, atunci alunecarea va crește, iar cuplurile dezvoltate de motoare vor fi mai mari și va apărea cuplul egalizator, unghiul de decalaj tinzînd către valoarea $\theta = 0$.

Capitolul 16

SCHEME DE ALIMENTARE ŞI COMANDĂ A ACŢIONĂRILOR ELECTRICE

A. CONSIDERAŢII GENERALE PRIVIND REALIZAREA ŞI REPREZENTAREA SCHEMELOR

Schemele de alimentare şi comandă simplificate, tipice pentru pornirea, varierea turaţiei şi frînarea motoarelor electrice utilizează aparatele studiate în capitolele anterioare pentru:

— protecţia circuitelor, motoarelor şi personalului de exploatare;
— conectarea motoarelor la reţeaua de alimentare cu energie electrică;
— varierea tensiunii de alimentare a înfăşurărilor motoarelor;
— varierea rezistenţelor suplimentare introduse în circuitele înfăşurărilor;
— varierea fluxului inductor al motoarelor;
— comanda pornirii, varierii turaţiei sau frînării.

În cazul instalaţiilor tehnologice reale, cu mai multe mecanisme acţionate electric, se urmăreşte realizarea unor scheme de alimentare şi comandă care să ţină seama de toate condiţiile impuse, atît fiecărui mecanism în parte, cît şi întregului ansamblu. Aceste scheme se realizează pornind de la schemele simplificate, completate de la caz la caz cu unele funcţiuni suplimentare:

— realizarea unei succesiuni corecte a pornirii şi opririi motoarelor electrice de acţionare;
— interblocarea circuitelor de alimentare a acelor motoare a căror funcţionare simultană este interzisă;
— efectuarea comenzilor de la distanţă sau local, automat sau manual;
— semnalizarea funcţionării motoarelor, poziţiei mecanismelor etc.;
— semnalizării de avertizare sau avarie;
— măsurarea parametrilor electrici, mecanici etc. ai mecanismului şi instalaţiei tehnologice.

Atunci cînd instalaţiile tehnologice impun menţinerea constantă a unor parametri sau varierea acestora după o anumită lege este necesară automatizarea acţionărilor electrice, prin introducerea regulatoarelor de curent, turaţie, acceleraţie etc.

Întrucît realizarea schemelor de alimentare şi comandă pentru instalaţii tehnologice reale diferă foarte mult pentru fiecare caz în parte, în funcţie de condiţiile reale impuse, iar automatizarea acţionărilor electrice constituie un obiect aparte, în prezentul capitol se tratează numai schemele de alimentare şi comandă simplificate.

Simbolurile utilizate, precum şi modul de reprezentare al schemelor de alimentare şi comandă sînt standardizate, pentru o mai uşoară înţelegere a schemelor elaborate în diferite întreprinderi.

Schema de alimentare şi comandă, este reprezentarea grafică convenţională a instalaţiei de acţionare electrică, adică a tuturor maşinilor şi aparatelor electrice, precum şi a legăturilor dintre acestea.

Circuitul de forţă, reprezentat cu linie groasă, conţine aparatele pentru conectarea la reţea şi pentru protecţia împotriva suprasarcinilor şi scurtcircuitelor, precum şi rezistenţele de pornire, reglaj sau frînare.

Circuitul de comandă, reprezentat cu linie subțire, conține aparatele de comandă (butoane, controlere, relee) și elementele de comandă ale aparatelor de conectare și protecție (bobine de anclanșare, contacte auxiliare).

Legăturile dintre mașini și aparate sînt reprezentate în ordinea lor logică, pentru a permite înțelegerea ușoară a schemei.

Schemele de alimentare și comandă pentru pornirea și frînarea motoarelor electrice trebuie să realizeze regimuri tranzitorii optime pentru acționările respective.

Schemele de pornire și frînare se alcătuiesc pe baza unor principii care asigură largi posibilități de realizare a regimurilor tranzitorii optime.

Pentru schemele de pornire trebuie avut în vedere că:

— pornirea prin cuplarea directă a motoarelor la rețeaua de alimentare se recomandă în cazul motoarelor de putere mică;

— pornirea cu rezistențe de pornire are rolul de a limita curentul de pornire la motoarele de putere mijlocie și mare.

Din examinarea curbelor de variație a curentului și turației în funcție de timp (v. cap. 13), rezultă că schemele electrice de pornire a motoarelor se pot alcătui pe baza următoarelor trei principii de pornire:

— în funcție de turație;
— în funcție de timp;
— în funcție de curent.

Măsurarea turației pentru utilizarea principiului pornirii în funcție de turație se poate face:

— direct, cu relee centrifugale sau tahogeneratoare;

— indirect, prin măsurarea unor parametri electrici proporționali cu turația.

În cazul motorului de curent continuu, turația este proporțională cu tensiunea electromotoare din indus, iar în cazul motorului asincron cu frecvența curentului din circuitul rotoric.

Schemele de pornire ale motoarelor electrice în funcție de timp sînt larg răspîndite în practică, datorită faptului că aparatele folosite (contactoare și relee de timp) se pot procura și regla ușor.

Pentru realizarea pornirii în funcție de curent se utilizează relee de curent astfel reglate, încît să cupleze la valoarea I_M și să decupleze la valoarea I_m a curentului de pornire.

B. SCHEME DE ALIMENTARE ȘI COMANDĂ PENTRU MOTOARELE ASINCRONE TRIFAZATE

1. PORNIREA ȘI INVERSAREA SENSULUI DE ROTAȚIE A MOTORULUI ASINCRON ÎN SCURTCIRCUIT, DE PUTERE MICĂ

Elementele principale ale schemei (fig. 16.1) sînt următoarele:
— electromotorul *m1*;
— contactoarele *c1*, *c2* pentru pornire și inversarea sensului de rotație, comandate prin butoane de comandă.

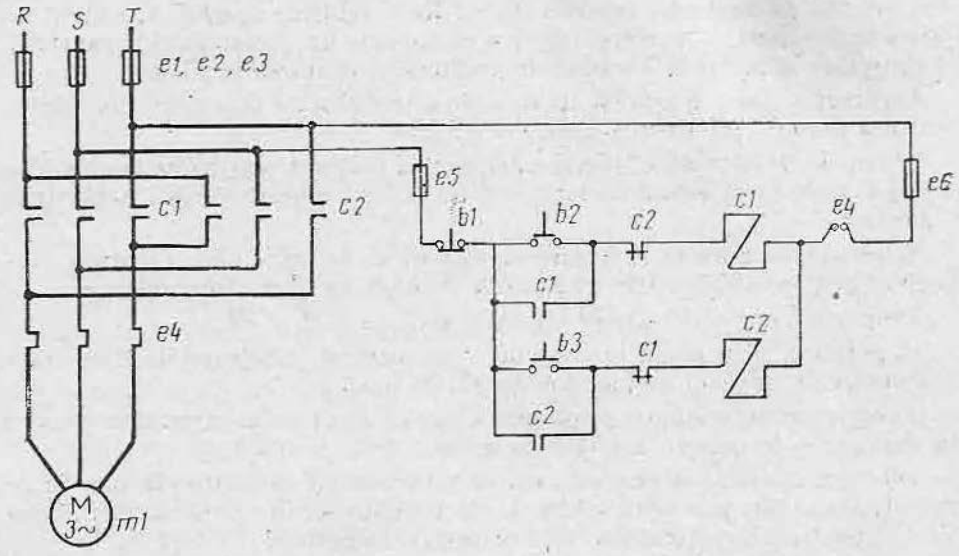


Fig. 16.1. Pornirea motorului asincron în scurtcircuit, de putere mică.

● **Pornirea motorului:**

— *se apasă butonul b2:*

● anclanșează *c1* care:

— prin c.a.n.d. (contact auxiliar normal deschis) se reține;
— prin c.a.n.î. (contact auxiliar normal închis) blochează pe c_2;
— prin C.P. (contacte principale) pornește m_1, în sens direct;

— *dacă se apasă butonul* b_3:

● anclanșează c_2 care:

— prin c.a.n.d. se reține;
— prin c.a.n.î. blochează pe c_1;
— prin C.P. pornește m_1, în sens invers.

● **Oprirea motorului**

Pentru aceasta se apasă butonul b_1 și astfel declanșează c_1, se deschid *C.P.*, se oprește m_1.

Observație. Dacă motorul a funcționat într-un anumit sens și s-a dat comanda de oprire, o nouă pornire în sens contrar poate fi comandată după scurgerea timpului necesar pentru oprirea completă a motorului. În caz contrar ar avea loc o frînare prin cuplare inversă, schema nefiind pregătită pentru aceasta.

Contactorul c_1 alimentează motorul cu succesiunea normală a fazelor *R, S, T,* iar contactul c_2 cu succesiunea *T, S, R,* care asigură inversarea sensului de rotație.

2. PORNIREA CU REZISTENȚE DE PORNIRE ÎN CIRCUITUL STATORIC AL MOTORULUI ASINCRON ÎN SCURTCIRCUIT, DE PUTERE MIJLOCIE SAU MARE

● **Elementele principale ale schemei** (fig. 16.2) sînt următoarele:
— *motorul* m_1 cu rezistența de pornire trifazată r_1;
— *contactorul* c_2 *pentru pornirea motorului*, comandat prin butoane de comandă;
— *contactorul* c_1 *pentru scurtcircuitarea rezistenței de pornire*, comandat prin releul de timp d_1.

● **Pornirea motorului:**
— *se apasă butonul* b_2:
● anclanșează c_2 care:
— prin *c.a.n.d.* se autoreține și alimentează bobina d_1;
— prin *C.P.* pornește motorul m_1 cu rezistența de pornire r_1 înseriată.

Motorul accelerează și după intervalul de timp t_1:

● d_1 cuplează și prin *c.n.d.* alimentează bobina c_1;
● anclanșează c_1 și prin *C.P.* scurtcircuitează rezistența r_1.

Motorul accelerează în continuare, atingînd turația nominală.

● **Oprirea motorului:**
— *se apasă butonul* b_1 și c_1 și c_2 se dezexcită — m_1 se oprește.

Observație. Pentru a preciza dacă motorul se pornește direct de la rețea sau prin intermediul unor rezistențe de pornire, se iau în considerație:
— puterea motorului;
— puterea transformatorului de alimentare și caracteristicile rețelei de alimentare.

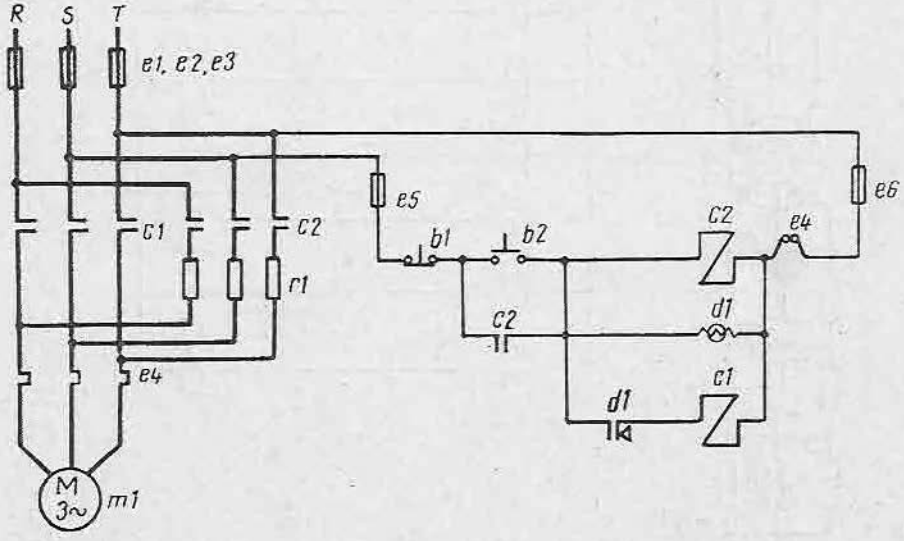


Fig. 16.2. Pornirea cu rezistențe de pornire în circuitul statoric al motorului asincron în scurtcircuit, de putere mijlocie sau mare.

De la caz la caz se stabilește căderea de tensiune pe care pornirea motorului o produce în rețea și dacă aceasta depășește limitele admisibile, se prevede pornirea cu rezistențe de pornire.

Pornirea motorului asincron în scurtcircuit de putere mijlocie sau mare se poate face de asemenea cu autotransformator de pornire.

3. PORNIREA CU REZISTENȚE DE PORNIRE ÎN CIRCUITUL ROTORIC, ÎN FUNCȚIE DE TIMP, A MOTORULUI ASINCRON CU INELE

● **Elementele principale ale schemei** (fig. 16.3) sînt următoarele:

— *motorul asincron cu inele* m_1 cu rezistența de pornire trifazată cu trei trepte r_1 inclusă în circuitul rotoric;

— *contactorul* c_1 *pentru conectarea motorului la rețea*, comandat prin butoane de comandă;

— *contactoarele* c_2, c_3, c_4 *pentru scurtcircuitarea rezistenței de pornire* r_1, comandate prin relee de timp.

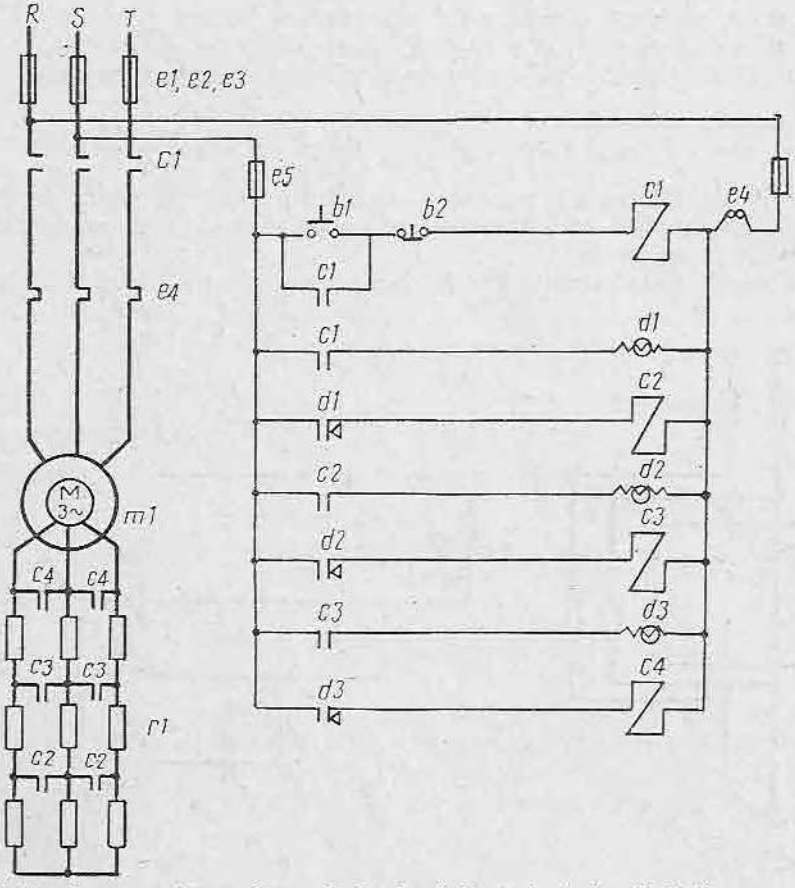


Fig. 16.3. Pornirea cu rezistențe de pornire în circuitul rotoric, în funcție de timp, a motorului asincron cu inele.

● **Pornirea motorului:**

— *se apasă butonul* b_1:

● anclașează c_1 care:

— prin *c.a.n.d.* se poate reține;

— prin *c.a.n.d.* alimentează bobina d_1;

— prin *C.P.* pornește motorul m_1 cu rezistența r_1 în circuitul rotoric.

Motorul m_1 accelerează și după intervalele de timp t_1, t_2, t_3:

— cuplează succesiv d_1, d_2, d_3 și prin *c.n.d.* alimentează bobinele c_2, c_3, c_4;

— anclașează c_2, c_3, c_4 care prin *C.P.* scurtcircuitează treptele de pornire ale rezistenței r_1.

Motorul m_1 accelerează pînă la turația nominală.

● **Oprirea motorului:**

— *se apasă butonul* b_2;

● se dezexcită c_1 și se oprește motorul m_1;

● c_2, c_3, c_4 se dezexcită reintroducînd în circuit rezistențele r_1.

Observație. Pornirea motorului asincron cu inele, cu rezistențe de pornire incluse în circuitul rotoric, se poate face în funcție de curent sau de turație, dar se preferă pornirea în funcție de timp, fiind mai ușor de realizat și de controlat.

4. FRÎNAREA DINAMICĂ A MOTORULUI ASINCRON ÎN SCURTCIRCUIT

● **Elementele principale ale schemei** (fig. 16.4) sînt următoarele:

— *motorul asincron în scurtcircuit* m_1;

— *transformatorul coborîtor* m_2 *și redresorul în punte* n_1 *pentru alimentarea cu curent continuu a statorului în* timpul frînării:

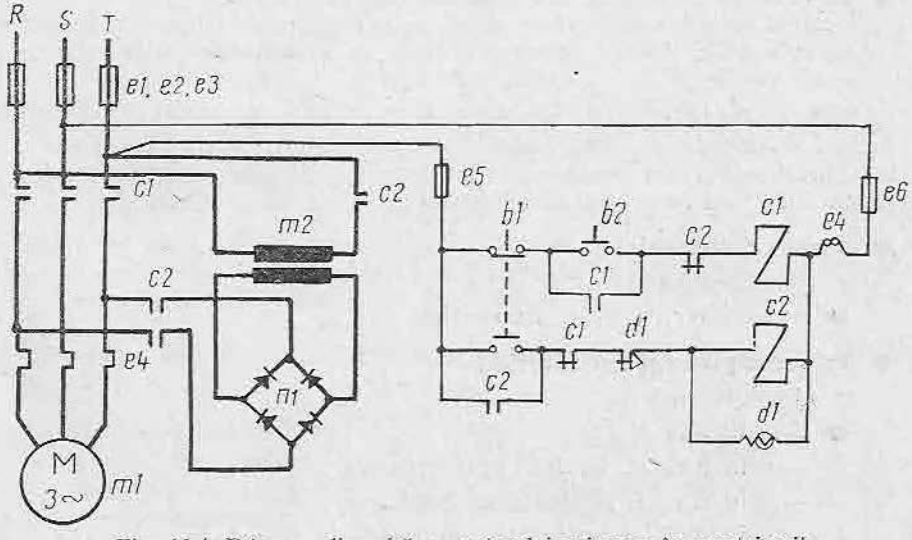


Fig. 16.4. Frînarea dinamică a motorului asincron în scurtcircuit.

— *contactorul* c_1 pentru conectarea la rețea a motorului, comandat prin butoane de comandă;
— *contactorul* c_2 *pentru frînare,* comandat printr-un releu de timp.

● **Pornirea motorului:**
— *se apasă butonul* b_2:
● se excită c_1 care se autoreține.

● **Frînarea dinamică:**
— *se apasă butonul* b_1:
● declanșează c_1 care:
— prin *c.a.n.d.* își taie autoreținerea;
— prin *c.a.n.î.* permite alimentarea bobinei c_2;
— prin *C.P.* deconectează motorul de la rețea;
● declanșează c_2 care:
— prin *c.a.n.d.* se reține;
— prin *c.a.n.î.* taie alimentarea bobinei c_1;
— prin *C.P.* alimentează primarul transformatorului m_2 și redresorul n_1.

Motorul frînează și, după trecerea timpului necesar pentru frînare:
● cuplează d_1 și prin *c.n.î.* taie alimentarea bobinei c_2 și a propriei sale bobine.

Observație. Schema prezentată realizează frînarea dinamică în funcție de timp, prin deconectarea de la rețea a motorului și conectarea a două faze ale statorului la o sursă de curent continuu.

5. FRÎNAREA PRIN CUPLARE INVERSĂ A MOTORULUI ASINCRON ÎN SCURTCIRCUIT

● **Elementele principale ale schemei** (fig. 16.5) sînt:
— *motorul asincron în scurtcircuit* m_1 cu rezistența de frînare trifazată r_1;
— *contactorul* c_1 *pentru conectarea la rețea a motorului,* comandat prin butoane de comandă;
— *contactorul* c_2 *pentru frînare prin cuplare inversă,* comandat prin releul u_1.

Releul de turație u_1 este astfel construit încît în stare de repaus contactele sînt deschise, iar în stare de funcționare se închide fie contactul *1 — 2,* fie contactul *1 —3 ,* corespunzător sensului de rotație al motorului.

● **Pornirea motorului:**
— *se apasă butonul* b_2:
● se excită c_1, care se autoreține.

● **Frînarea prin cuplare inversă:**
— *se apasă butonul* b_1:
● declanșează c_1 care:
— prin *c.a.n.d.* își taie autoreținerea;
— prin *c.a.n.î.* alimentează bobina c_2;
— prin *C.P.* deconectează motorul de la rețea;

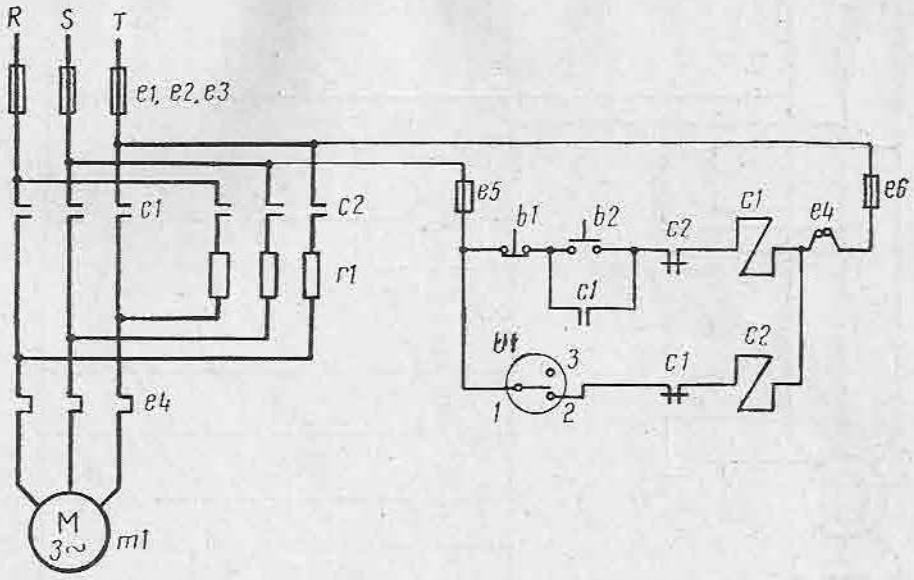


Fig. 16.5. Frînarea prin cuplare inversă a motorului asincron în scurtcircuit.

● declanșează c_2 care prin *C.P.* conectează motorul la rețea cu fazele inversate prin rezistența r_1.

Motorul frînează și în momentul atingerii turației zero, contactul *1 — 2* al releului de turație u_1 se deschide, deci:

● declanșează c_2 care:
— prin *c.a.n.î* permite alimentarea din nou a bobinei c_1;
— prin *C.P.* deconectează motorul de la rețea.

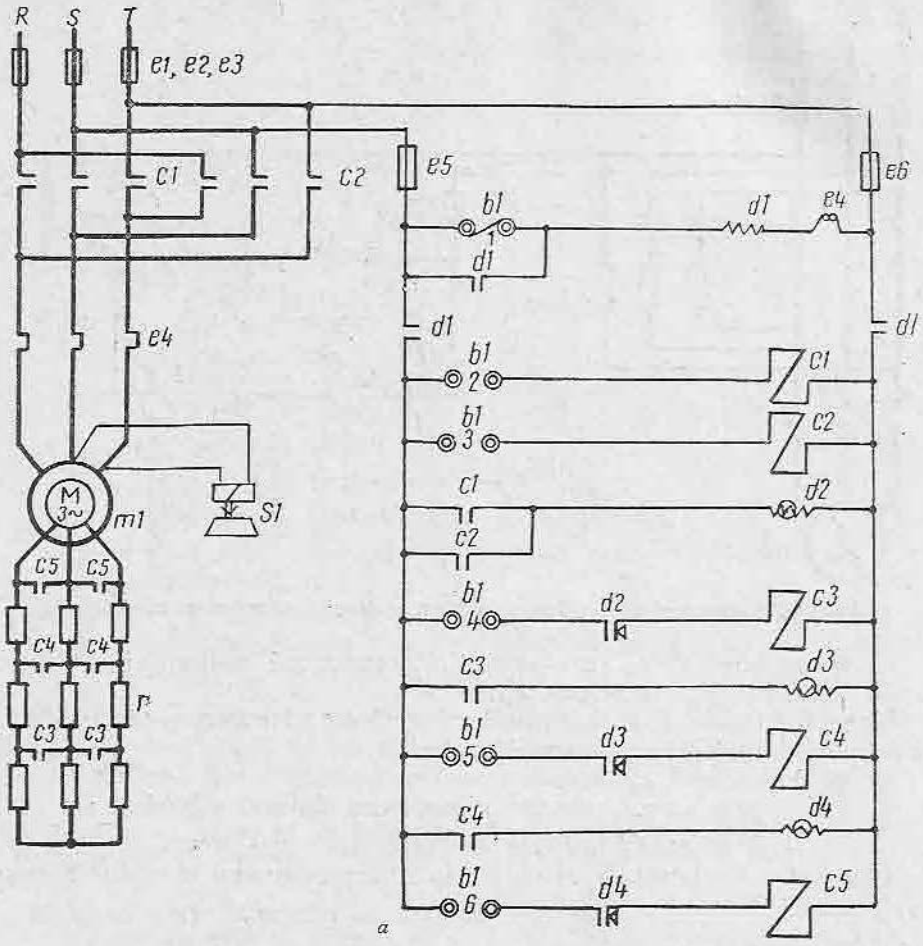
Observație. Rezistența r_1 are rolul de a limita curentul și cuplul în timpul frînării.

6. VARIEREA TURAȚIEI CU REZISTENȚE DE REGLARE LA MOTORUL ASINCRON CU INELE

● **Elementele principale ale schemei** (fig 16.6, *a*) sînt următoarele:
— *motorul asincron cu inele* m_1 cu rezistența de pornire și reglare trifazată r_1 și electromagnetul de frînă s_1;
— *contactoarele* c_1, c_2 *pentru conectarea motorului la rețea și inversarea sensului de rotație*, comandate prin controler de comandă;
— *contactoarele* c_3, c_4, c_5 *pentru scurtcircuitarea treptelor de pornire și reglare*, comandate prin controlerul de comandă b_1 și prin releele de timp d_2, d_3 și d_4.

Diagrama închiderii contactoarelor controlerului de comandă b_1 este dată în figura 16.6, *b*.

● **Pornirea motorului:**
— *se pune controlerul* b_1 *pe poziția zero* (contactul *1* închis);
● cuplează d_1 și prin *c.n.d.* se autoreține și alimentează schema de comandă;



Poziția / Contacte	Înainte				0	Înapoi			
	4	3	2	1		1	2	3	4
1					×				
2	×	×	×	×					
3						×	×	×	×
4	×	×	×				×	×	×
5	×	×						×	×
6	×								×

b

Fig. 16.6. Varierea turației cu rezistențe introduse în circuitul rotoric al motorului asincron cu inele.

— *se pune controlerul pe poziția 4 „înainte"* (contactele *2, 4, 5, 6* închise):
- anclanșează c_1 care:
  — prin *c.a.n.d* alimentează bobina d_2;
  — prin *c.a.n.î* blochează pe c_2;
  — prin *C.P* pornește motorul cu rezistența r_1 închisă în circuitul rotoric, iar electromagnetul s_1 acționează frîna pentru ridicarea saboților

Motorul accelerează și după intervalele timp t_1, t_2, t_3:
— cuplează d_2, d_3, d_4 și prin *c.n.d.* alimentează bobinele c_3, c_4, c_5;
— anclanșează c_3, c_4, c_5 și prin *C.P.* scurtcircuitează treptele de pornire ale rezistenței r_1.

Motorul accelerează pînă la atingerea turației nominale.

- **Varierea turației motorului.** Dacă se pune controlerul pe o altă poziție, de exemplu poziția *2* „înainte", anclanșează numai contactoarele c_2 și c_3, deci motorul accelerează pînă la turația n_1 corespunzătoare scurtcircuitării unei singure trepte a rezistenței de pornire și reglare și continuă să funcționeze cu această turație.

Dacă motorul funcționează cu turația nominală, rezistența de pornire și reglare fiind complet scurtcircuitată, și se trece controlerul de exemplu de pe poziția *4* „înainte" pe poziția *3* „înainte" declanșează contactul c_5 și se introduce în circuit treapta de rezistență corespunzătoare. Turația motorului scade la valoarea n_2, corespunzătoare funcționării cu două trepte scurtcircuitate.

La trecerea de la o viteză inferioară la o viteză superioară, procesul tranzitoriu este controlat prin relee de timp.

- **Oprirea motorului:**

— se pune controlerul pe poziția zero (contactul *1* închis):
- declanșează toate contactoarele și releele de timp;
- își pierde alimentarea electromagnetului de frînă și lasă saboții să preseze cuplajul frînei.

Observație. Funcționarea schemei pentru pozițiile „înapoi" ale controlerului se explică similar, sensul de rotație al motorului fiind inversat.

Rezistența r_1 este inclusă în circuit atît în timpul pornirii cît și în timpul funcționării motorului pe trepte de turație mai mici decît turația nominală. Din această cauză, rezistențele de pornire și reglare trebuie să fie mai larg dimensionate decît rezistențele de pornire, prin care trece curent numai în timpul pornirii.

C. SCHEME DE ALIMENTARE ȘI COMANDĂ PENTRU MOTOARELE DE CURENT CONTINUU

1. PORNIREA ȘI INVERSAREA SENSULUI DE ROTAȚIE LA MOTORUL DERIVAȚIE DE CURENT CONTINUU DE PUTERE MICĂ

- **Elementele principale ale schemei** (fig. 16.7) sînt următoarele:

— motorul de curent continuu m_1 cu înfășurarea de excitație E_x;
— contactoarele c_1, c_2 pentru pornirea și inversarea sensului de rotație, comandate prin butoane de comandă;

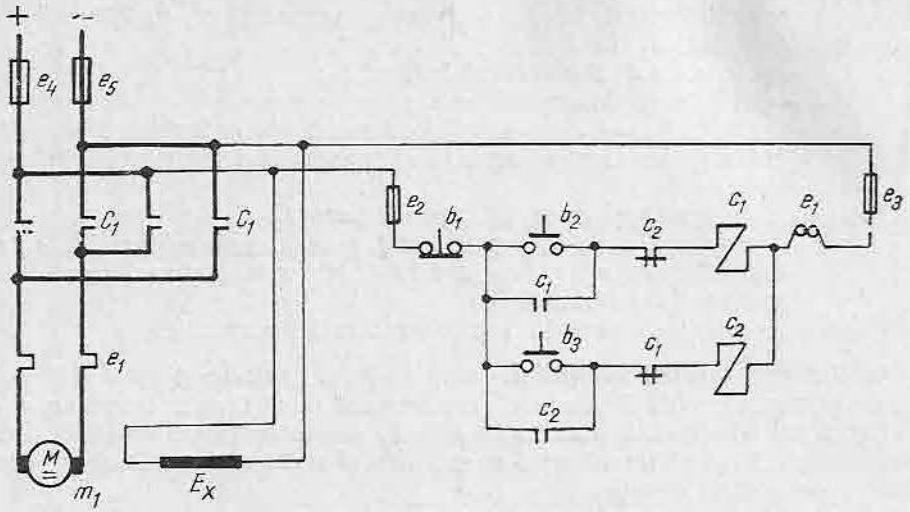


Fig. 16.7. Pornirea și inversarea sensului de rotație la motorul derivație de curent continuu de putere mică.

— aparatele de protecție a circuitelor de forță și de comandă: releul de curent maxim e_1 și siguranțele fuzibile e_2, e_3, e_4, e_5.

● **Pornirea motorului** se realizează prin apăsare pe butonul b_2 sau b_3.

● **Oprirea motorului.**

Se apasă butonul b_1.

2. PORNIREA CU REZISTENȚE DE PORNIRE, ÎN FUNCȚIE DE TIMP, A MOTORULUI DERIVAȚIE DE CURENT CONTINUU

● **Elementele principale ale schemei** (fig. 16.8) sînt următoarele:

— motorul de curent continuu m_1 cu înfășurarea de excitație E_x, prevăzut cu rezistențele de pornire r_1, r_2;

— contactorul c_1 pentru conectarea motorului la rețea, comandat prin butoane de comandă;

— contactoarele c_2, c_3, pentru scurtcircuitarea rezistențelor de pornire, comandate prin releele de timp d_1, d_2.

● **Pornirea motorului**:

— *se apasă butonul* b_1:

- anclanșează c_1 care:
  - — prin c.a.n.d. alimentează bobina releului de timp d_1;
  - — prin C.P. pornește m_1 cu r_1, r_2 incluse în circuitul indusului.

După intervalul de timp t_1 cînd motorul ajunge la turația n_1:

- acționează d_1 și prin c.a.n.d. alimentează bobina c_2;
- declanșează c_2 care:
  - — prin c.a.n.d. alimentează bobina releului de timp d_2;
  - — prin C.P. scurtcircuitează r_1.

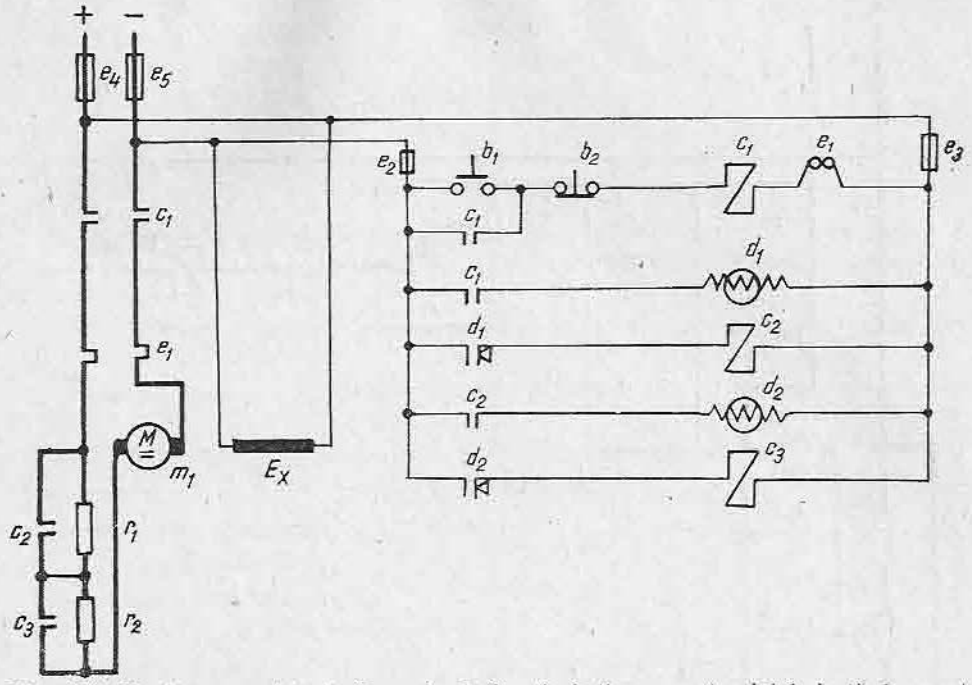


Fig. 16.8. Pornirea cu rezistențe de pornire, în funcție de timp, a motorului derivație de curent continuu.

Motorul accelerează în continuare și după intervalul de timp t_2 cînd ajunge la turația n_2;

- acționează d_2 și prin *c.n.d.* alimentează bobina c_3;
- anclanșează c_3 și prin *C.P.* scurtcircuitează r_2.

Motorul accelerează pînă la atingerea turației nominale.

- **Oprirea motorului:**

— *se apasă butonul* b_2*:*

- se dezexcită c_1 — se întrerupe circuitul m_1.

Observație. Releele de timp sînt reglate pentru a comanda scurtcircuitarea rezistențelor de pornire la intervalele de timp t_1, t_2, calculate astfel încît *pornirea să fie conformă principiului pornirii în funcție de timp* expus în capitolul 3.

3. PORNIREA CU REZISTENȚE DE PORNIRE, ÎN FUNCȚIE DE TURAȚIE, A MOTORULUI DERIVAȚIE DE CURENT CONTINUU

- **Elementele principale ale schemei** (fig. 16.9) sînt următoarele:

— *motorul de curent continuu* m_1 cu înfășurarea de excitație E_x, prevăzut cu rezistențele de pornire r_1, r_2, r_3;

— *contactorul* c_1 *pentru conectarea motorului la rețea,* comandat prin butoane de comandă;

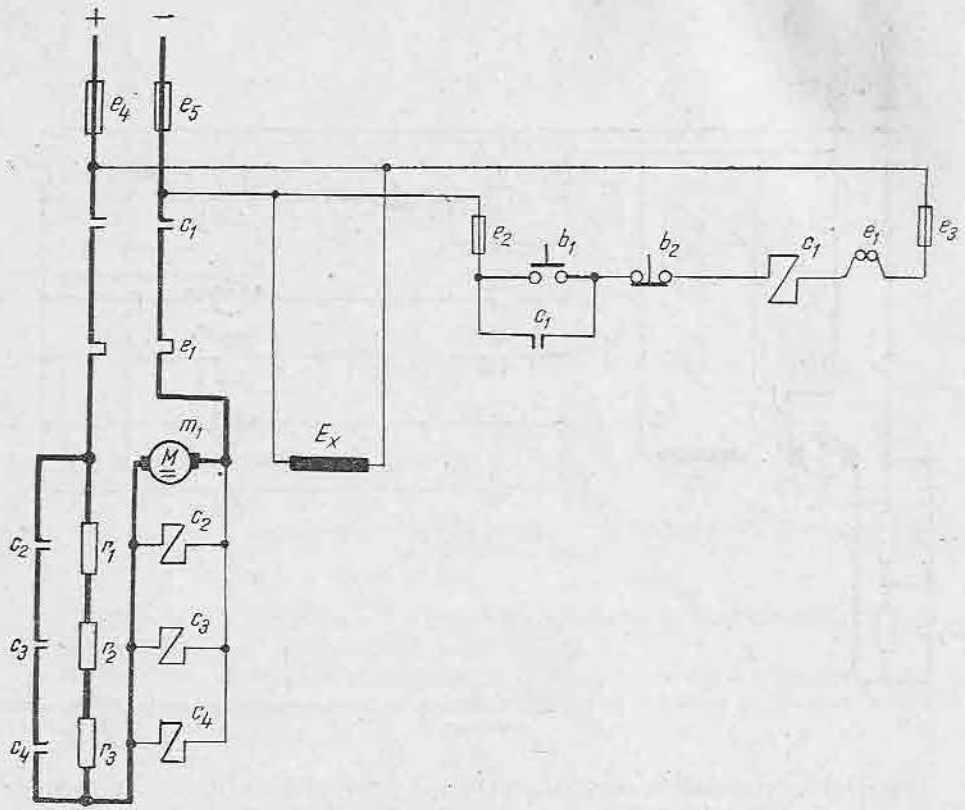


Fig. 16.9. Pornirea cu rezistențe de pornire, în funcție de turație, a motorului derivație de curent continuu.

— *contactoarele* c_2, c_3, c_4, *pentru scurtcircuitarea* rezistențelor de pornire.

Notă. Contactoarele c_2, c_3, c_4 sînt astfel alese încît anclanșarea lor să aibă loc succesiv la valorile $E_1 = C_e n_1$, $E_2 = C_e n_2$, $E_3 = C_e n_3$ ale tensiunii electromotoare din indus, adică la valorile n_1, n_2, n_3 ale turației motorului.

- **Pornirea motorului:**

— *se apasă butonul* b_1:

- anclanșează c_1 care:
- prin *c.a.n.d.* se autoreține;
- prin *C.P.* pornește m_1 cu r_1, r_2, r_3 incluse în circuitul indusului.

Pe măsură ce motorul accelerează atingînd valorile n_1, n_2, n_3 ale turației, tensiunea electromotoare ia valorile E_1, E_2, E_3 și succesiv:

- anclanșează c_2 care prin *C.P.* scurtcircuitează r_1;
- anclanșează c_3 care prin *C.P.* scurtcircuitează r_2;
- anclanșează c_4 care prin *C.P.* scurtcircuitează r_3.

În continuare motorul accelerează pînă la atingerea valorii nominale a turației.

● **Oprirea motorului:**

— *se apasă butouul* b_2*:*

● se dezexcită c_1 și se întrerupe m_1.

4. PORNIREA CU REZISTENȚE DE PORNIRE, ÎN FUNCȚIE DE CURENT A MOTORULUI DE CURENT CONTINUU

● **Elementele principale ale schemei** (fig. 16.10) sînt următoarele:

— *motorul de curent continuu* m_1 cu înfășurarea de excitație E_x, prevăzut cu rezistențele de pornire r_1, r_2;

— *contactorul* c_1 *pentru conectarea motorului la rețea,* comandat prin butoane de comandă;

— *contactoarele* c_2, c_3, *pentru scurtcircuitarea rezistențelor de pornire,* comandate prin relee de curent.

Releele de curent d_1 și d_2 sînt reglate să cupleze la valoarea I_M a curentului din indus și să decupleze la valoarea I_m.

● **Pornirea motorului:**

— *se apasă butonul* b_1*;*

● anclanșează c_1 care:

— prin *c.a.n.d.* se autoreține;

— prin *C.P.* pornește m_1 cu r_1, r_2 incluse în circuitul indusului.

Deoarece curentul din indus care se închide prin bobina d_1 și prin rezistențele r_1, r_2, are valoarea inițială (maximă) I_M:

● cuplează d_1 care:

— prin *c.n.î.* blochează pe c_2 (nici c_3 nu poate anclanșa datorită *c.a.n.d.* al contactorului c_2).

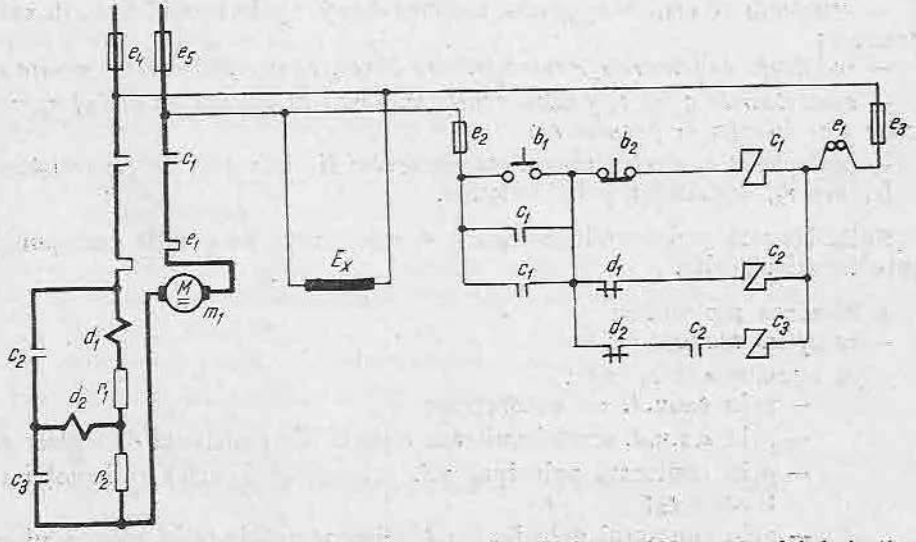


Fig. 16.10. Pornirea cu rezistențe de pornire, în funcție de curent, a motorului derivație de curent continuu.

Motorul accelerează pînă cînd, la valoarea n_1 a turației, curentul din indus are valoarea minimă I_m, deci:

- decuplează d_1 și prin *c.n.î.* alimentează bobina c_2;
- anclanșează c_2 care:

— prin *c.a.n.d.* pregătește alimentarea bobinei lui c_3;

— prin *C.P.* scurtcircuitează r_1 și bobina d_1, scoțîndu-le din funcție.

Curentul din indus se închide acum prin *C.P.*, c_2, bobina d_2 și rezistența r_2 și are din nou valoarea I_M, deci:

- cuplează d_2 și prin *c.n.î.* blochează pe c_3.

Motorul accelerează din nou pînă la turația n_2, corespunzătoare valorii I_m a curentului din indus, deci:

- decuplează d_2 și prin *c.n.î.* alimentează bobina c_2;
- anclanșează c_3 și prin *C.P.* scurtcircuitează r_2 și bobina d_2, scoțîndu-le din funcție.

- **Oprirea motorului:**

— *se apasă butonul* b_2.

Observație. Schemele de pornire în funcție de curent se utilizează mai rar în practică, și anume atunci cînd se cere o precizie mare a pornirii.

5. VARIEREA TURAȚIEI PRIN MODIFICAREA FLUXULUI INDUCTOR ȘI FRÎNAREA DINAMICĂ LA MOTORUL DERIVAȚIE DE CURENT CONTINUU DE PUTERE MICĂ

- **Elementele principale ale schemei** (fig. 16.11) sînt următoarele:

— *motorul de curent continuu* m_1 cu înfășurarea de excitație E_x protejată de rezistența de descărcare r_1 împotriva supratensiunii;

— *rezistența de reglare* r_2 *pentru varierea turației* prin modificarea fluxului inductor;

— *rezistența de frînare* r_3 *pentru frînare dinamică și rezistența de pornire* r_4;

— *contactoarele* c_1 și c_2 *pentru scurtcircuitarea rezistenței de reglaj* r_2, *respectiv a rezistenței de pornire* r_4;

— *contactorul* c_3 *pentru conectarea motorului* fie la rețea, fie pe rezistența de frînare r_3, comandat prin butoane.

Notă. Maneta rezistenței de reglare r_2 este fixată pe poziția corespunzătoare turației dorite.

- **Pornirea motorului:**

— *se apasă butonul* b_2:

- anclanșează c_3 care:

— prin *c.a.n.d.* se autoreține;

— prin *c.a.n.d.* scurtcircuitează o parte din rezistența de reglare r_2;

— prin contactul principal *n.î.* întrerupe circuitul rezistenței de frînare r_3;

— prin contactul principal *n.d.* alimentează indusul motorului m_1 înseriat cu rezistența de pornire r_4.

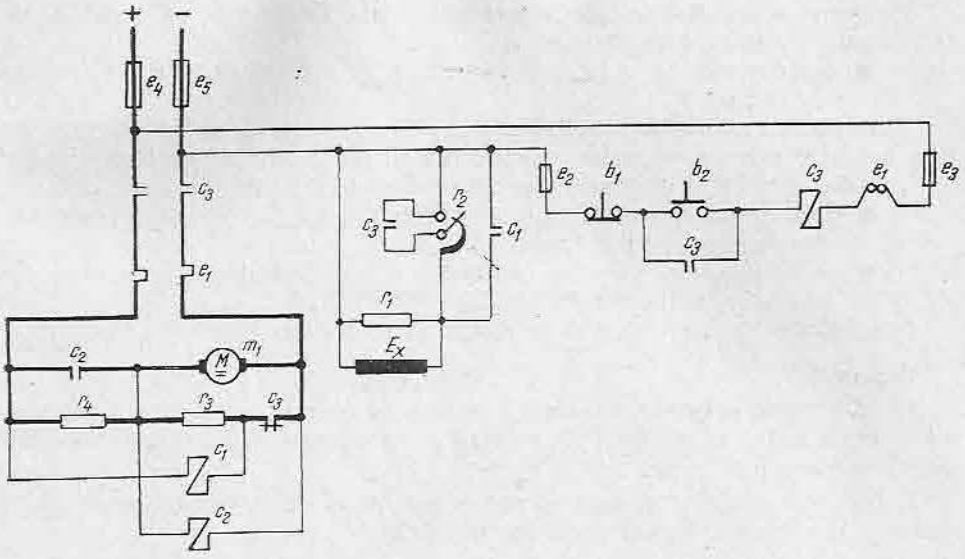


Fig. 16.11. Varierea turației prin modificarea fluxului inductor și frînarea dinamică la motorul derivație de curent continuu de putere mică.

Deoarece bobina contactorului c_1 este alimentată cu tensiune de la bornele rezistenței r_4, și această tensiune este mare la pornire:

- anclanșează c_1 și

— prin contactul *n.d.* scurtcircuitează complet rezistența de reglare r_2.

În aceste condiții motorul pornește cu rezistența de pornire r_4 inclusă în circuitul indusului și cu flux inductor maxim (rezistența de reglare r_2 scurtcircuitată). După un interval de timp în care tensiunea electromotoare din indus atinge valoarea $E_1 = C_{en1}$:

- anclanșează c_2 și prin contactul principal *n.d.* scurtcircuitează rezistența de pornire r_4, alimentînd indusul motorului direct de la rețea și anulînd tensiunea de alimentare a bobinei c_1;
- declanșează c_1 și prin contactul *n.d.* introduce o parte din rezistența de reglare r_2 în circuitul înfășurării de excitație, micșorînd prin aceasta fluxul inductor.

Datorită scurtcircuitării rezistenței de pornire r_4 și a introducerii parțiale a rezistenței de reglare r_2, turația motorului crește de la valoarea n_1 pînă la valoarea corespunzătoare poziției manetei rezistenței de reglare r_2.

- **Varierea turației:**

— *se schimbă poziția manetei rezistenței de reglare* r_2.

- **Frînarea dinamică:**

— *se apasă butonul* b_1:

- declanșează c_3 care:

— prin contactul principal *n.d.* deconectează motorul m_1 de la rețea;

— prin contactul principal *n.î.* conectează motorul pe rezistența de frînare r_3.

Deoarece acum bobina contactorului c_1 este alimentată cu tensiune de la bornele rezistenței de frînare r_3:

- anclanșează c_1 și prin contactul *n.d.* scurtcircuitează rezistența de reglare r_2.

Rezultă că motorul frînează dinamic pe rezistența r_3, avînd asigurat un flux inductor maxim, datorită scurtcircuitării rezistenței de reglare r_2.

Turația motorului și tensiunea electromotoare din indus scad, deci:

- declanșează c_2 și prin contactul principal *n.d.* reintroduce rezistența de pornire r_4 în circuitul indusului;
- declanșează c_1 și prin contactul *n.d.* reintroduce rezistența de reglare r_2 completă în circuitul de excitație.

Spre sfîrșitul opririi, fluxul inductor al motorului scade.

Observații.

1) În schema prezentată pornirea se face în funcție de turație, contactorul c_2 fiind astfel reglat încît să anclanșeze la valoarea $E_1 = C_{1cn}$ a tensiunii electromotoare din indus.

2) Variercea turației se face la valori mai mari decît valoarea nominală, căreia îi corespunde fluxul inductor maxim.

6. UTILIZAREA REDRESOARELOR COMANDATE PENTRU COMANDA MOTORULUI DE CURENT CONTINUU

a. Principiul de funcționare al redresoarelor comandate

● **Redresoarele comandate utilizate** pentru comanda motorului de curent continuu sînt:

— *redresoarele cu vapori de mercur* (ignitroane și excitroane);

— *redresoarele cu tiristoare.*

Așa cum s-a arătat în capitolul 9, redresoarele cu vapori de mercur și tiristoarele sînt prevăzute cu grile sau electrozi de comandă.

● **Principiul reglajului prin grile de comandă** (fig. 16.12) se bazează pe faptul că în prezența tensiunii negative de blocare pe grilă, redresorul nu conduce chiar dacă tensiunea anodică U_a este pozitivă. Dacă tensiunea negativă pe grilă scade sau devine pozitivă sub forma unui impuls * (fig. 16.12) și tensiunea anodică este pozitivă, redresorul începe să conducă la un unghi α și conduce pînă cînd tensiunea anodică trece prin valoarea zero ($\omega t = \pi$) și devine negativă. Grila servește deci numai pentru „aprinderea" arcului în redresorul cu vapori de mercur sau pentru intrarea în conducție a tiristorului. Curentul anodic I_a are o valoare medie I_{amed} care scade pe măsura creșterii unghiului α la care se aplică impulsul pozitiv U_g.

Rezultă că redresorul conduce numai în porțiunea hașurată a semiperioadei și se blochează la sfîrșitul acesteia datorită negativării tensiunii anodice. Limitele de variere a curentului I_a sînt cuprinse între zero și valoarea nominală.

---

* De fapt valoarea necesară a tensiunii de grilă pentru ca tubul să se aprindă este o funcție de tensiunea anodică U_a.

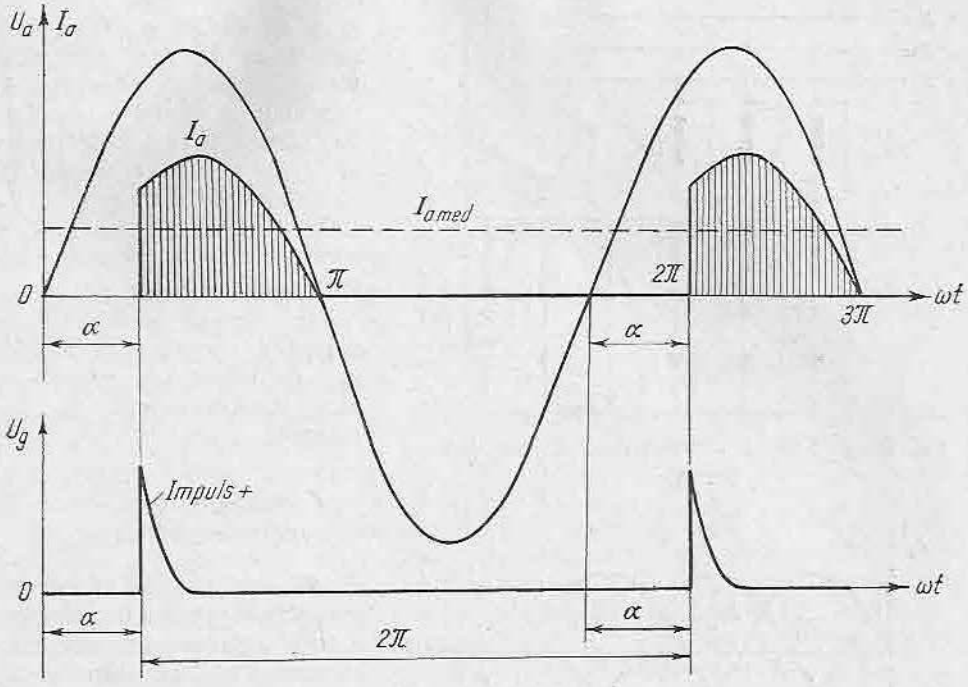


Fig. 16.12. Schemă explicativă pentru reglarea valorii medii a tensiunii redresate, prin aplicarea impulsurilor pozitive pe grilă.

b. Dispozitive de aprindere

Comanda pe grilă se face prin impulsuri date de dispozitive de aprindere. Aceste dispozitive asigură producerea impulsurilor în ritmul corespunzător frecvenței tensiunii anodice și decalarea lor în raport cu începutul semiperioadelor pentru modificarea valorii medii a curentului redresat ($I_{a\,med}$).

● **Cel mai simplu dispozitiv de producere și decalare a impulsurilor** este reprezentat în figura 16.13.

Unghiul α poate fi modificat cu ajutorul rezistenței variabile r_2.

Sarcina (care poate fi un motor) este cuplată la tensiunea rețelei prin tiristorul n_6. La începutul unei semiperioade a tensiunii anodice tiristorul este blocat, dioda specială nu conduce și condensatorul k_1 se încarcă prin intermediul rezistenței reglabile

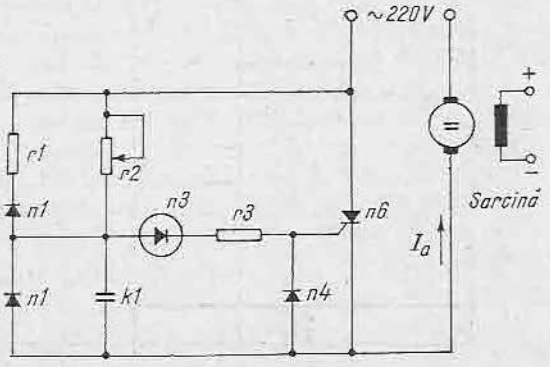


Fig. 16.13. Dispozitiv simplu de producere și decalare a impulsurilor.

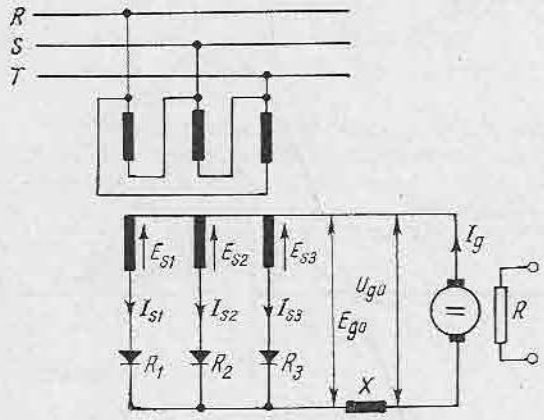


Fig. 16.14. Schema de principiu a unui redresor trifazat.

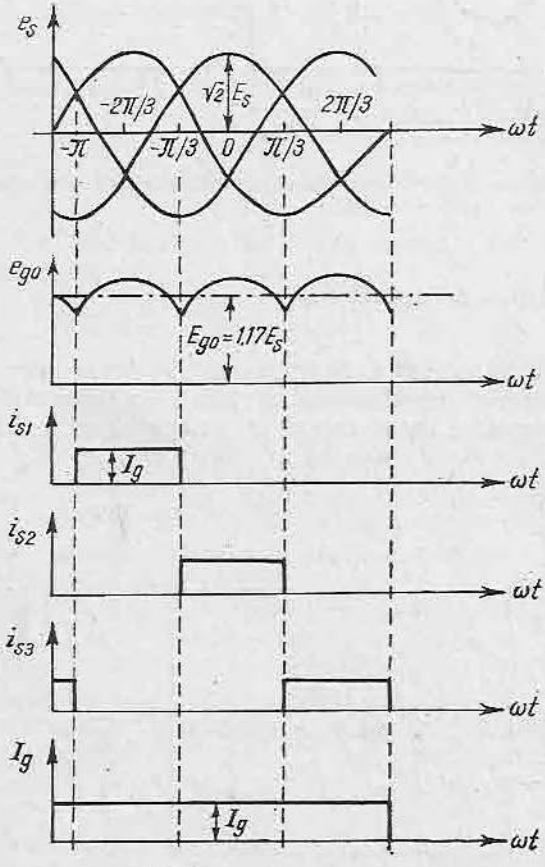


Fig. 16.15 Curbele de variație ale tensiunilor și curenților pentru redresorul trifazat necomandat.

r_2 și al diodei n_3. Cînd tensiunea la bornele condensatorului depășește tensiunea de basculare a diodei n_3, aceasta basculează și prin descărcarea lui k_1 se obține un impuls pe electrodul de comandă. Tiristorul începe să conducă și conduce pînă la sfîrșitul semiperioadei pozitive.

În timpul semiperioadei negative, circuitul se închide prin diodele n_1 și rezistența r_1, iar condensatorul nu se încarcă.

c. Scheme de redresare trifazate

● În figura 16.14 este reprezentată **schema de principiu a unui redresor trifazat,** constituită dintr-un redresor trifazat cu primarul în triunghi, trei elemente redresoare R_1, R_2, R_3 și o bobină de filtrare X astfel aleasă încît să mențină curentul I_g la consumator la o valoare practic constantă.

Fazele secundare ale transformatorului sînt legate la anozii elementelor redresoare.

Polul pozitiv este constituit de catozii elementelor redresoare, legați între ei, iar polul negativ de punctul mediu al celor trei înfășurări secundare.

Curbele variației tensiunilor și curentului în cazul utilizării unor elemente redresoare necomandate sînt reprezentate în figura 16.15.

Tensiunile secundare pe fază e_{s1}, e_{s2}, e_{s3} se succed la intervale de 120° electrice. Fiecare element redresor începe să conducă în momentul în care tensiunea aplicată atinge valoarea maximă în sens de

conducție. După cum se observă în figură, primului element redresor i se aplică tensiunea e_{s1} și aceasta are valoarea maximă în sens de conducție în momentul $-\pi$. Elementul începe să conducă și conduce pînă în momentul $-\frac{\pi}{2}$, cînd e_{s2} are valoarea maximă în sens de conducție, deci începe să conducă elementul al doilea. Tensiunea redresată rezultantă e_{s0} este de asemenea reprezentată în figură și prin filtrarea ei se obțin curenții i_{s1}, i_{s2}, i_{s3} și curentul rezultant I_s care este un curent continuu practic complet filtrat.

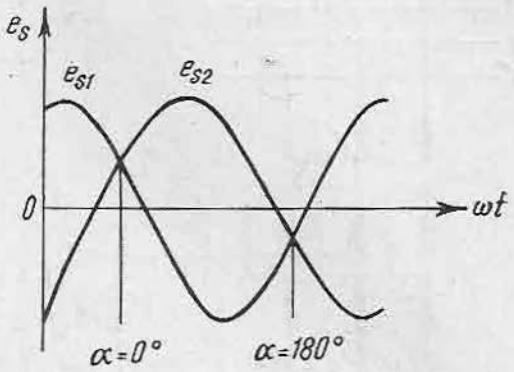


Fig. 16.16. Domeniul de variație al regimului comandat.

În cazul regimului de redresare comandat, starea blocată a redresorului se menține și în perioada naturală de conducție, cînd tensiunea anodică este mai pozitivă decît cea catodică. Dacă ne referim la figura 16.16 în regim necomandat, aprinderea se face în punctul de aprindere natural $\alpha = 0$. În regim comandat, aprinderea se face în intervalul $0 < \alpha < 180°$ prin aplicarea voită a unui impuls de pozitivare a grilei (v. fig. 16.12).

● În figura 16.17 este reprezentată **schema de redresare trifazată cu punct median,** cu înfășurarea secundară în zigzag, care asigură faptul că fiecare curent din secundar debitat în redresor parcurge două semiînfășurări montate în opoziție pe coloane diferite. În felul acesta, efectul componentelor continue ale curenților din secundar se anulează.

d. Scheme de redresare hexafazate

Principiile și noțiunile de bază expuse la redresoarele trifazate se regăsesc și la redresoarele hexafazate.

● În cazul redresoarelor cu vapori de mercur cea mai utilizată **schemă de redresare hexafazată** este aceea **prevăzută cu bobină de absorbție** (fig. 16.18). În această schemă conduc simultan cel puțin doi anozi și deci transformatorul și elementele redresoare sînt mai bine utilizate.

În secundarul transformatorului înfășurările sînt secționate, formînd două sisteme trifazate decalate cu 60°, conectate între punctele mediane prin intermediul bobinei de absorbție B_a. Bobina de absorbție preia diferența de tensiune existentă între punctele mediane ale celor două sisteme trifazate, datorită diferențelor de tensiune la bornele elementelor redresoare.

● **Redresorul hexafazat în punte trifazată** reprezentat în figura 16.19 este utilizat în cea mai mare măsură la tiristoare și este compus din două sisteme trifazate conectate în serie. Fiecare din cele două sisteme trifazate are o comutație independentă și datorită decalajului dintre ele, deși sînt comandate cu același unghi α, se obține o pulsație hexafazată a tensiunii redresate. Curentul din înfășurările secundare circulă în timpul ambelor alter-

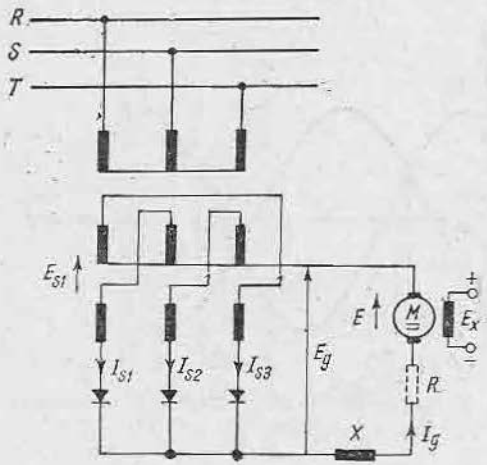


Fig. 16.17. Schema de redresare trifazată cu punct median, cu înfășurarea secundară în zigzag.

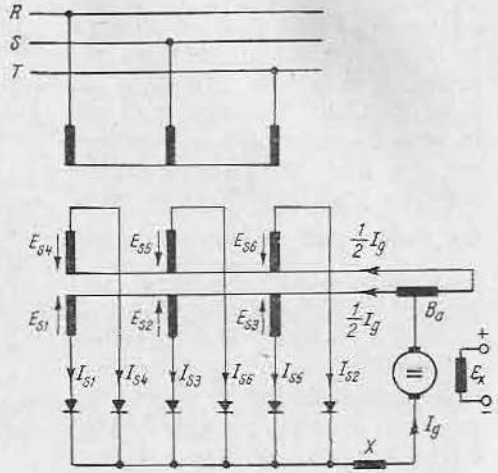


Fig. 16.18. Schema de redresare hexafazată cu bobină de absorbție.

nanțe ale tensiunii aplicate fazei respective, ceea ce duce la o bună utilizare a transformatorului.

Tensiunea între două faze ale secundarului se aplică la două elemente redresoare înseriate, fiecare element redresor preluînd numai jumătate din tensiune, ceea ce duce la o solicitare de tensiune a elementului redresor mai mică decît în cazul redresorului hexafazat cu bobină de absorbție. De aceea această schemă este preferată în acționările cu tiristoare.

Înfășurarea secundară a transformatorului poate fi în stea sau triunghi.

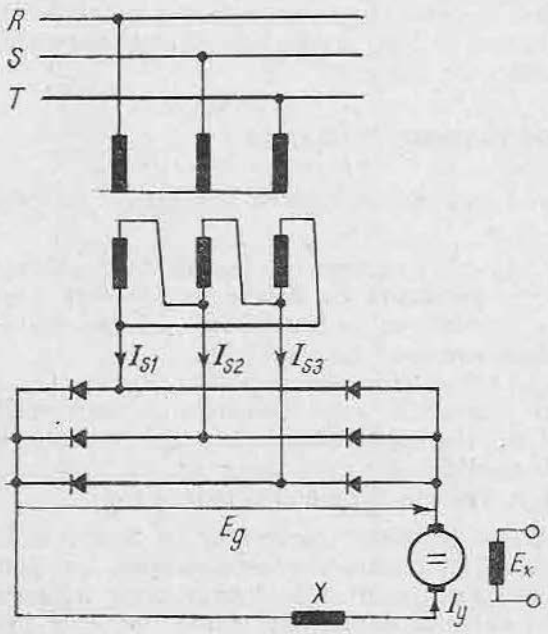


Fig. 16.19. Schema de redresare hexafazată în punte trifazată.

e. Puntea trifazată semicomandată

● Atunci cînd se face reglarea în domeniul pozitiv al tensiunii medii redresate, se adoptă schema în **punte semicomandată** (fig. 16.20) în care jumătate din punte este prevăzută cu diodele de siliciu D_1, D_2, D_3 iar cealaltă jumătate cu tiristoarele T_1, T_2, T_3. Avantajul acestei scheme este reducerea numărului de tiristoare și de dispozitive de aprindere.

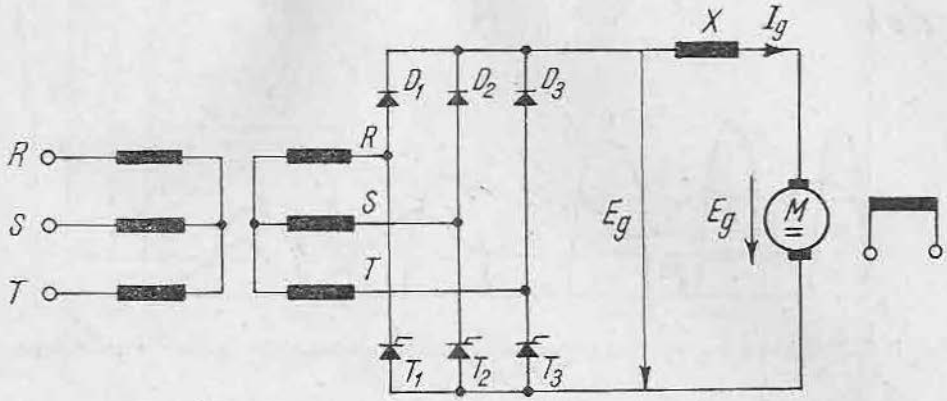


Fig. 16.20. Schema de redresare în punte trifazată semicomandată.

D. SCHEME DE ALIMENTARE ŞI COMANDĂ PENTRU MOTOARE SINCRONE

1. PORNIREA MOTORULUI ASINCRON DE JOASĂ TENSIUNE, ÎN FUNCŢIE DE VITEZĂ, CU AUTOTRANSFORMATOR DE PORNIRE

Pornirea în regim asincron a motorului sincron se poate face direct numai atunci cînd construcţia motorului şi reţeaua de alimentare permit acest lucru.

Alimentarea înfăşurării de excitaţie se închide pe o rezistenţă la începutul pornirii, pentru a preîntîmpina apariţia tensiunilor ridicate, neadmise, la cuplarea statorului la reţea. Alimentarea cu curent continuu a înfăşurării de excitaţie în momentul atingerii vitezei subsincrone se face în una sau două trepte. Momentul de alimentare a înfăşurării de excitaţie se alege astfel încît sincronizarea să fie cît mai rapidă, şocurile de curent în circuitul statoric cît mai mici, iar timpul de pornire suficient de scurt pentru a preîntîmpina supraîncălzirea înfăşurării de pornire a motorului.

Important!

1) Alimentarea înfăşurării de excitaţie înainte de cuplarea statorului la tensiunea nominală se recomandă numai în cazul încărcării reduse a motorului, deoarece cuplul de sincronizare este mic.

2) Alimentarea înfăşurării de excitaţie cu tensiunea redusă, adică în trepte, se recomandă în cazul pornirii în gol a motoarelor, deoarece cuplul de sincronizare este de asemenea mic.

3) În cazul pornirii motorului sub sarcină, alimentarea excitaţiei se face numai pe o singură treaptă şi numai după cuplarea statorului la tensiunea nominală.

Sincronizarea motorului sincron pornit în regim asincron este o operaţie extrem de importantă, în care se urmăreşte ca şocurile de curent să fie minime şi cuplurile de sincronizare maxime. Pentru a se realiza aceste deziderate, este necesar ca alimentarea rotorului cu curent continuu să se facă cu o

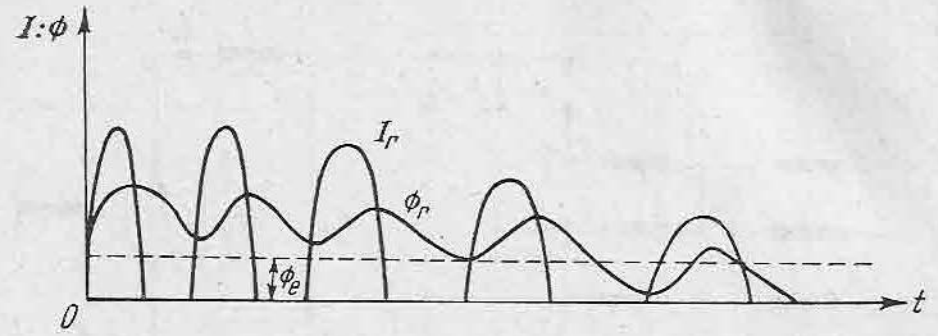


Fig. 16.21. Diagrama de variație a curentului și fluxului în releul de succesiune a alternanțelor rotorice.

alunecare cît mai mică, în momentul cînd axele polilor S ale rotorului sînt în urmă cu cel mult 15 ... 30 grade electrice față de polii N ai statorului.

Sincronizarea în funcție de viteză asigură o pornire destul de precisă cu ajutorul releului de succesiune a alternanțelor rotorice, care este de fapt un releu de timp cu temporizare la decuplare (cu spiră în scurtcircuit). Acest releu este înseriat cu un redresor uscat și este legat pe o rezistență de descărcare în circuitul rotoric al motorului sincron.

Curentul alternativ indus în înfășurarea de excitație în timpul pornirii, trece prin bobina releului numai în jumătățile de perioadă în care sensul curentului coincide cu sensul de conducție al redresorului. În figura 16.21 s-a prezentat curentul I_r din bobina releului și fluxului Φ_r, din circuitul magnetic al releului, Φ_e este fluxul de eliberare a armăturii releului. Se observă că deși bobina nu este alimentată cu curent între două jumătăți de perioadă, fluxul Φ_r, se menține în permanență mai mare decît fluxul de eliberare Φ_e și releul nu eliberează armătura.

Fluxul Φ_r devine mai mic decît fluxul de eliberare Φ_e numai atunci cînd alunecarea scade foarte mult și intervalul dintre semiperioadele curentului I_r crește, iar amplitudinea acestora scade. Atunci releul își eliberează armătura și alimentează cu curent continuu înfășurarea de excitație.

Observație. Din cele arătate mai sus se constată că releul de succesiune a alternanțelor rotorice măsoară atît alunecarea, cît și unghiul de decalaj, decuplînd atunci cînd acest unghi are valori apropiate de zero.

● **Elementele principale ale schemei** (fig. 16.22) sînt următoarele:

— *motorul sincron* m_1 cu înfășurările reprezentate prin cercuri concentrice: cercul exterior reprezintă înfășurarea statorică, iar cercul interior înfășurarea rotorică (de excitație);

— *autotransformatorul de pornire* m_3;

— *excitatoarea* m_2 cu înfășurarea de excitație E_x și reostatul r_1 pentru reglarea excitației;

— *releul de succesiune a alternanțelor rotorice* d_1 înseriat cu *redresorul* n_1 și legate pe *rezistența de descărcare* r_2 *din circuitul înfășurării rotorice de excitație*;

— *contactorul* c_1 *pentru conectarea autotransformatorului de pornire în circuitul statoric la începutul pornirii*, comandat prin butoane de comandă;

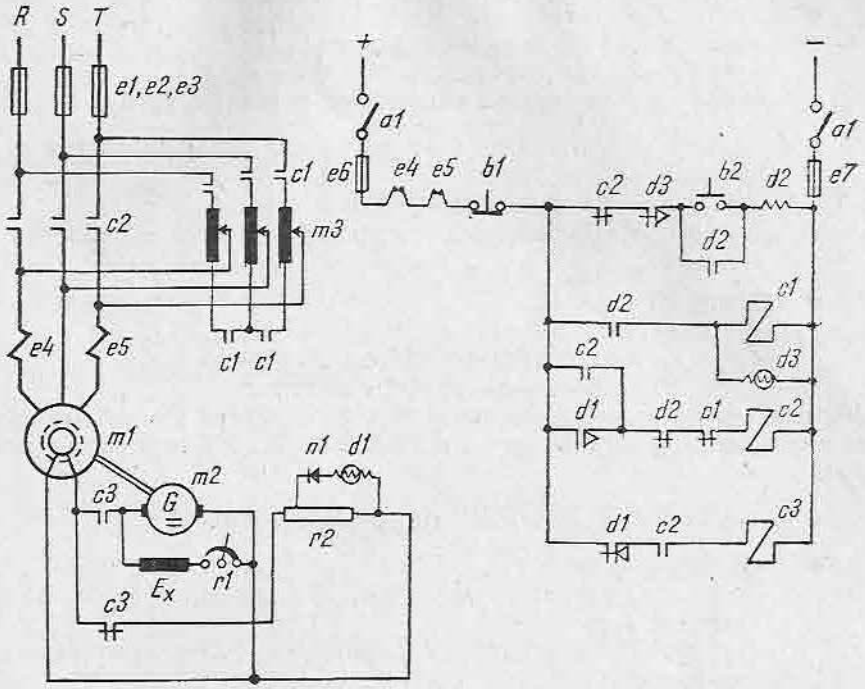


Fig. 16.22. Pornirea motorului sincron de joasă tensiune, în funcție de viteză, cu autotransformator de pornire.

— *contactorul* c_2 *pentru conectarea motorului direct la rețea,* comandat prin releul de timp d_3;

— *contactorul* c_3 *pentru conectarea excitației la înfășurarea rotorică de excitație,* comandat prin releul de succesiune a alternanțelor rotorice.

● **Pornirea motorului:**

— *se apasă butonul* b_2 *;*

- cuplează d_2 care:
  — prin *c.n.d.* se autoreține;
  — prin *c.n.d.* alimentează bobinele c_1, d_3;
  — prin *c.n.î.* blochează pe c_2;
- anclanșează c_1 care:
  — prin *c.a.n.î.* blochează pe c_2;
  — prin *C.P.* conectează autotransformatorul m_3 în circuitul statoric.

În momentul cuplării statorului motorului la rețea, tensiunea electromotoare în rotor are o valoare maximă și o frecvență maximă, egală cu frecvența rețelei. Din această cauză:

- cuplează d_1 și prin *c.n.î.* blochează pe c_3.

Motorul, pornit prin anclanșarea lui c_1 accelerează și după trecerea intervalului de timp afectat alimentării statorului cu tensiune redusă:

- cuplează d_3 și prin *c.n.î.* taie alimentarea bobinei d_2;

- decuplează d_2 care:
  — prin *c.n.d.* își taie autoreținerea;
  — prin *c.n.d.* taie alimentarea bobinelor c_1, d_3;
  — prin *c.n.î.* pregătește alimentarea bobinei c_2;

- decuplează d_3 și prin *c.n.î.* nu mai poate alimenta bobina d_2; declanșează c_1 care:
  — prin *c.a.n.î.* alimentează bobina c_2;
  — prin *C.P.* deconectează autotransformatorul m_3 din circuitul statoric;

- anclanșează c_2 care:
  — prin *c.a.n.î.* blochează pe d_2;
  — prin *c.a.n.d.* pregătește alimentarea bobinei c_3;
  — prin *C.P.* conectează motorul la rețea.

Motorul accelerează în continuare pînă la atingerea vitezei subsincrone la care trebuie să se alimenteze cu curent continuu înfășurarea rotorică de excitație, cînd:

- decuplează d_1 și prin *c.n.î.* alimentează bobina c_3;

- anclanșează c_3 care:
  — prin *c.n.î.* deconectează releul de succesiune a alternanțelor rotorice d_1;
  — prin *C.P.* conectează excitatoarea în înfășurarea rotorică de excitație.

Excitatoarea m_2 se autoexcită, alimentînd cu curent continuu rotorul motorului sincron. Motorul se sincronizează și începe să funcționeze în condiții normale.

- **Oprirea motorului:**
  — *se apasă butonul* b_1:

- se dezexcită d_2 și revine c_1—c_2.

Observație. Dacă timpul de sincronizare depășește o anumită limită, pornirea trebuie să fie anulată. Pentru aceasta se folosește un releu de timp (nefigurat) care începe să temporizeze din momentul alimentării statorului la tensiunea nominală și deconectează întreaga schemă dacă nu se atinge în limite de timp normale viteza subsincronă necesară pentru alimentarea cu curent continuu a înfășurării de excitație.

2. FRÎNAREA MOTORULUI SINCRON

Pornirea motorului sincron comportă o serie de dificultăți, ceea ce restrînge domeniul de utilizare al motoarelor sincrone la acționările în regim de lungă durată, cu porniri și opriri rare. Din această cauză problema frînării se pune foarte rar, și numai în situațiile în care este necesară o oprire rapidă a mecanismului acționat. În aceste situații se folosește exclusiv frînarea dinamică și aceasta constă în:

— *deconectarea înfășurării statorice de la rețea;*
— *conectarea înfășurării statorice pe o rezistență exterioară trifazată;*
— *excitarea rotorului la maximum.*

După oprirea motorului se dezexcită rotorul și se deconectează înfășurarea statorică de la rezistența de frînare.

Comanda frînării se face în funcție de timp.

REZUMAT

- *Pornirea*
  - directă
  - indirectă prin rezistențe de pornire — în funcție de
    - turație
    - timp
    - curent

- *Frînarea*
  - dinamică
  - prin conectare inversă
  - în regim de generator cu recuperare de energie în rețea

- *Scheme de alimentare și comandă pentru motoarele de curent continuu*

Excitație derivație
- putere mică
  - pornire directă
  - pornire funcție de
    - turație
    - timp
    - curent
- putere mijlocie și mare
  - frînare
    - prin cuplare inversă
    - dinamică
  - inversarea sensului de rotație — frînarea prin cuplare inversă + pornire inversă funcție de timp
  - varierea turației
    - prin variația fluxului inductor;
    - prin alimentare directă cu amplidină;
    - prin reducerea tensiunii de alimentare

Excitație serie sau mixtă — scheme similare

- *Utilizarea redresoarelor comandate*
  - scheme de redresare trifazate
    - transformator Δ/Y
    - transformator Y/Y
    - transformator Y/Y în zigzag
  - scheme de redresare hexafazate
    - cu bobină de absorbție
    - în punte trifazată
    - în punte trifazată semicomandată

- *Pornirea motoarelor asincrone*
  - în scurtcircuit
    - putere mică
      - direct
    - putere mijlocie sau mare
      - cu rezistențe cu pornire
      - cu autotransformator de pornire
  - cu inele
    - cu rezistențe de pornire comandate cu contactoare și relee
      - în funcție de timp
      - în funcție de curent
      - în funcție de turație
    - cu rezistențe de pornire comandate cu amplificatoare magnetice

- *Frînarea motoarelor asincrone*
  - în scurtcircuit
    - dinamică
      - în funcție de timp
      - în funcție de curent
      - în funcție de turație
    - prin cuplare inversă
      - în funcție de timp
      - în funcție de curent
      - în funcție de turație
  - cu inele
    - dinamică
      - în funcție de timp
      - în funcție de curent
      - în funcție de turație
    - prin cuplare inversă
      - în funcție de timp
      - în funcție de curent
      - în funcție de turație

- *Reglarea turației motoarelor asincrone*
  - în scurtcircuit
    - prin variația numărului de perechi de poli
  - cu inele
    - cu rezistențe de reglaj în circuitul rotoric.

- *Pornirea motorului sincron*
  - de putere mică și joasă tensiune
    - directă
  - de putere mare și joasă tensiune
    - cu autotransformator
      - cu releu de succesiune a alternanțelor rotorice

- *Frînarea motorului sincron*
  - frînarea dinamică
    - în funcție de timp

VERIFICAREA CUNOȘTINȚELOR

1. De ce motoarele cu putere mijlocie și mare nu pot fi pornite direct de la rețea?

2. Să se enunțe principiile de pornire a motoarelor electrice.

3. Ce este frînarea dinamică?

4. Ce este frînarea prin conectare inversă și cum se realizează?

5. Să se explice funcționarea tuturor schemelor fără a se citi textul.

6. Să se modifice schema pornirii motorului derivație de curent continuu în funcție de timp (v. fig. 16.8) folosind relee de timp cu temporizare de decuplare pentru comanda scurt-circuitării rezistențelor de pornire.

7. Să se modifice schema pornirii motorului derivație în funcție de turație (fig. 16.9) înlocuind bobinele contactoarelor speciale c_2, c_3, c_4 cu bobinele unor relee de tensiune care să comande contactoare normale de scurtcircuitare a rezistențelor de pornire.

8. Ce rol au dispozitivele de aprindere?

9. Ce este regimul de redresare necomandat?

10. Ce este regimul de redresare comandat?

11. La ce servește bobina de absorbție la schemele de redresare hexafazate?

12. De ce se folosește conexiunea în punte trifazată în cazul tiristoarelor?

13. Ce metode se utilizează pentru pornirea motorului asincron în scurtcircuit de putere mijlocie sau mare?

14. În ce constă principiul de frînare dinamică la motorul asincron în scurtcircuit? Dar la motorul asincron cu inele?

15. Cum se realizează frînarea prin cuplare inversă la motorul asincron în scurtcircuit? Dar la motorul asincron cu inele?

16. Ce tipuri de relee au fost utilizate pentru controlul frînării în schemele prezentate pînă acum?

17. Cum se face și în ce situații se utilizează pornirea directă a motorului sincron?

18. Cum se alimentează înfășurările statorice în cazul pornirii prin autotransformator sau reactor?

19. Ce dezavantaj are alimentarea înfășurării de excitație înainte de cuplarea statorului la tensiunea nominală?

20. Dar alimentarea în trepte a înfășurării de excitație?

21. Ce urmărește și care este principiul de funcționare a releului de succesiune a alternanțelor rotorice?

22. Ce urmărește și care este principiul de funcționare a releului pentru controlul alunecării?

23. Să se introducă în schema pornirii motorului sincron de joasă tensiune releul de timp pentru controlul timpului de pornire.

24. Cum se face frînarea dinamică a motorului sincron?

Capitolul 17

ACȚIONĂRI HIDRAULICE ȘI PNEUMATICE

A. NOȚIUNI GENERALE

Datorită unor condiții specifice ce vor fi prezentate mai jos, în unele cazuri este necesară acționarea anumitor agregate (sarcini) cu ajutorul unor motoare neelectrice, în speță folosind energia unui lichid sub presiune (motoare hidraulice) sau a unui gaz sub presiune (motoare pneumatice). Au apărut astfel *acționările hidraulice*, folosind de obicei uleiul sub presiune și *acționările pneumatice*, folosind de obicei aerul comprimat.

Dacă în cazul acționărilor electrice se dispune, în general, de un sistem energetic național care asigură sursa de energie electrică, în cazul acționărilor hidraulice sau pneumatice, acestea avînd un caracter local, apare necesară realizarea unor surse „generatoare" de energie hidraulică (de exemplu o pompă de ulei sau mai multe constituind instalația de ulei sub presiune) sau de energie pneumatică (de exemplu o instalație de aer comprimat).

Schema structurală a unei acționări hidraulice sau pneumatice (fig. 17.1) cuprinde în principiu generatorul hidraulic (pneumatic) G antrenat de obicei de motorul electric E și care transmite fluidul energetic F (ulei sau aer comprimat) motorului M care antrenează sarcina (utilajul) S.

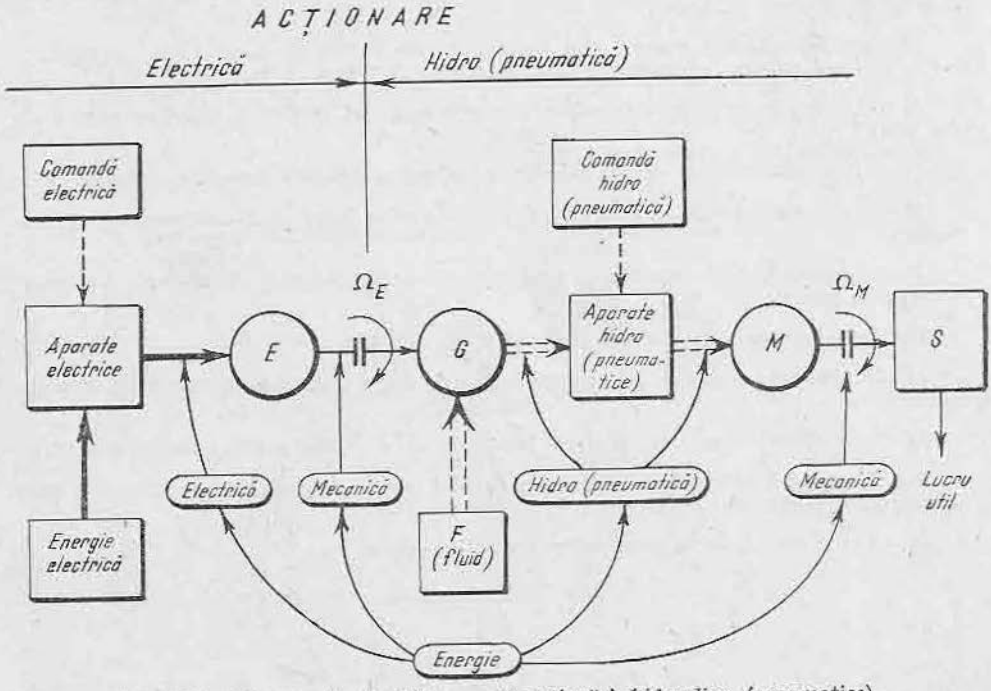


Fig. 17.1. Schema structurală a unei acționări hidraulice (pneumatice).

Se constată că față de o schemă de acționare electrică, între motorul E și sarcina S s-a interpus sistemul generator-motor (G-M) hidraulic sau pneumatic avînd propria sa comandă (hidraulică sau pneumatică).

Acest sistem constituie, de fapt, o acționare electrohidraulică (electropneumatică).

În locul motorului electric, mai ales pe instalațiile mobile, se poate prevedea un motor cu ardere internă, de exemplu un motor Diesel. Un asemenea sistem poartă denumirea de acționare diesel-hidraulică ca de exemplu acela folosit la locomotiva diesel-hidraulică ce se fabrică în țara noastră la Întreprinderea 23 August din Capitală.

Paralel cu introducerea acționărilor hidraulice și pneumatice au luat naștere și s-au dezvoltat elemente de automatizare hidraulice și pneumatice (traductoare, amplificatoare, relee etc.), precum și elementele fluidice, construite pe baza efectului Coandă care, folosind aerul comprimat, îndeplinesc funcții logice (ȘI, SAU, NICI etc.) în cadrul unor scheme logice de automatizări fluidice similare cu schemele logice cu semiconductoare.

B. ELEMENTELE SISTEMELOR DE ACȚIONARE HIDRAULICĂ

1. STRUCTURA SISTEMELOR HIDRAULICE

În funcție de condițiile mașinii de lucru (sarcină) motoarele hidraulice pot realiza:

— o mișcare circulară (de rotație), ca de exemplu la locomotiva diesel-hidraulică;

— o mișcare liniară (deplasare), ca de exemplu la presă hidraulică.

Structural, sistemele de acționare hidraulică pot fi realizate cu circuit închis (fig. 17.2, *a*) sau cu circuit deschis (fig. 17.2, *b*). Îm ambele cazuri, pompa P împinge uleiul sub presiune în motorul hidraulic M avînd mișcare circulară, iar uleiul uzat este adus direct la pompă (fig. 17.2, *a*) sau se scurge în rezervorul R de unde este aspirat de pompă. În figura 17.2, *c* s-a prezentat schema unei acționări hidraulice cu circuit deschis și motor hidraulic cu mișcare liniară.

În acționările hidraulice se folosește în general uleiul mineral cu o viscozitate redusă (2—6° Engler la 50°C) realizat în condiții speciale de rafinare ca de exemplu: uleiurile de turbină Tb 5004 și Tb 5005, uleiul de transformator 2005* etc.

Avantajele principale ale sistemelor de acționare hidraulică sînt:

— posibilitatea varierii continue a vitezei de acționare, existența unui sistem de comandă hidraulică asigurînd posibilități multiple de manevrare;

— funcționare liniștită, fără zgomot și fără vibrații;

— posibilitatea realizării cu ușurință a forțelor (presiunilor) mari;

— organele componente funcționînd chiar în ulei nu necesită instalații de ungere;

— deși reprezintă o instalație în plus (în cascadă) într-un lanț de acționare, aceasta face posibilă eliminarea unor organe importante care altfel ar

* Exemplu: 2005 = 20—05 adică la 20°C are o viscozitate de 05° Engler.

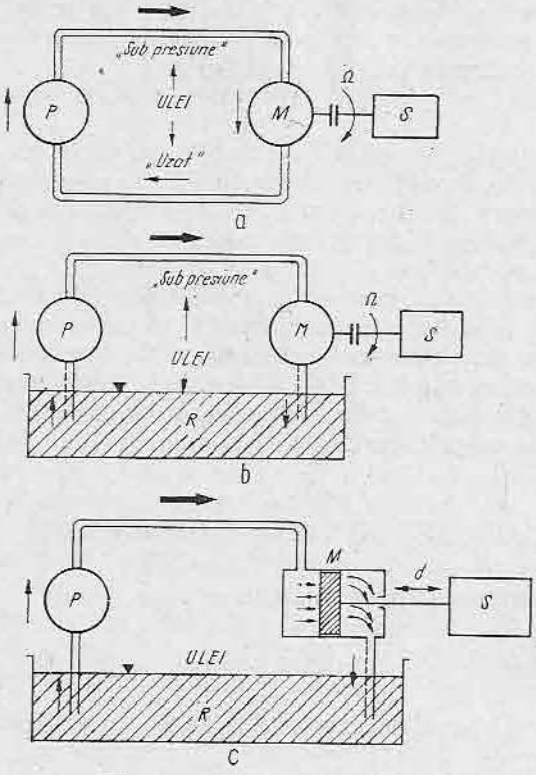


Fig. 17.2. Structura sistemelor hidraulice:
a — cu circuit închis și mișcare circulară; *b* — cu circuit deschis și mișcare circulară; *c* — cu circuit deschis și mișcare liniară.

fi fost necesare. De exemplu, în cazul unei locomotive diesel-hidraulice se elimină cutia de viteze și ambreiajul care în cazul unei locomotive diesel ar fi fost necesare. În plus, la puteri mari (1 000—2 000 CP), realizarea cutiei de viteze dar mai ales a ambreiajului devine practic imposibilă.

Dezavantajele sistemelor de acționare hidraulice sînt:

— pierderi relativ mari prin frecare în elementele componente (pompe, conducte etc.) pierderi care cresc rapid cu viteza de curgere a uleiului;

— costuri relativ ridicate al elementelor componente datorită preciziei deosebite în prelucrarea acestora;

— pericol de incendiu datorită inflamabilității uleiului mineral.

2. GENERATOARE (POMPE) HIDRAULICE

Pompele se folosesc pentru transformarea energiei mecanice primită de la motorul electric (diesel) în energie hidraulică.

Pompele hidraulice se pot clasifica astfel:

— *pompe cu debit variabil:* cu piston, cu paletă etc.;

— *pompe cu debit constant:* cu roți dințate, cu palete și dublă acțiune etc.

În figura 17.3 este prezentată schematic o pompă cu debit variabil și pistoane radiale.

Rotorul *R* are un număr de găuri cilindrice (de exemplu 6) dispuse radial, în care se deplasează un număr corespunzător de pistoane *P* a căror extremitate semicirculară calcă pe inelul *C* al carcasei pompei.

Prin rotire, datorită excentricității *e* a rotorului față de carcasă, pistoanele capătă o mișcare radială în cilindri, conform sensului de rotație Ω. În acest caz, în porțiunea *a-b-c* pistoanele îndepărtîndu-se succesiv de centrul de rotație *O* cilindrii se umplu cu ulei din camera de aspirație *A* (vezi și secțiunea longitudinală), iar în porțiunea *c-d-a* pistoanele apropiindu-se de centru împing uleiul din cilindri în conducta de refulare *B*.

Se observă că pompa își poate schimba sensul de refulare prin modificarea excentricității *e*. Astfel, cînd $e = 0$ adică rotorul este centrat față de carcasă, pistoanele se rotesc însă nu se mai deplasează radial astfel că debitul pom-

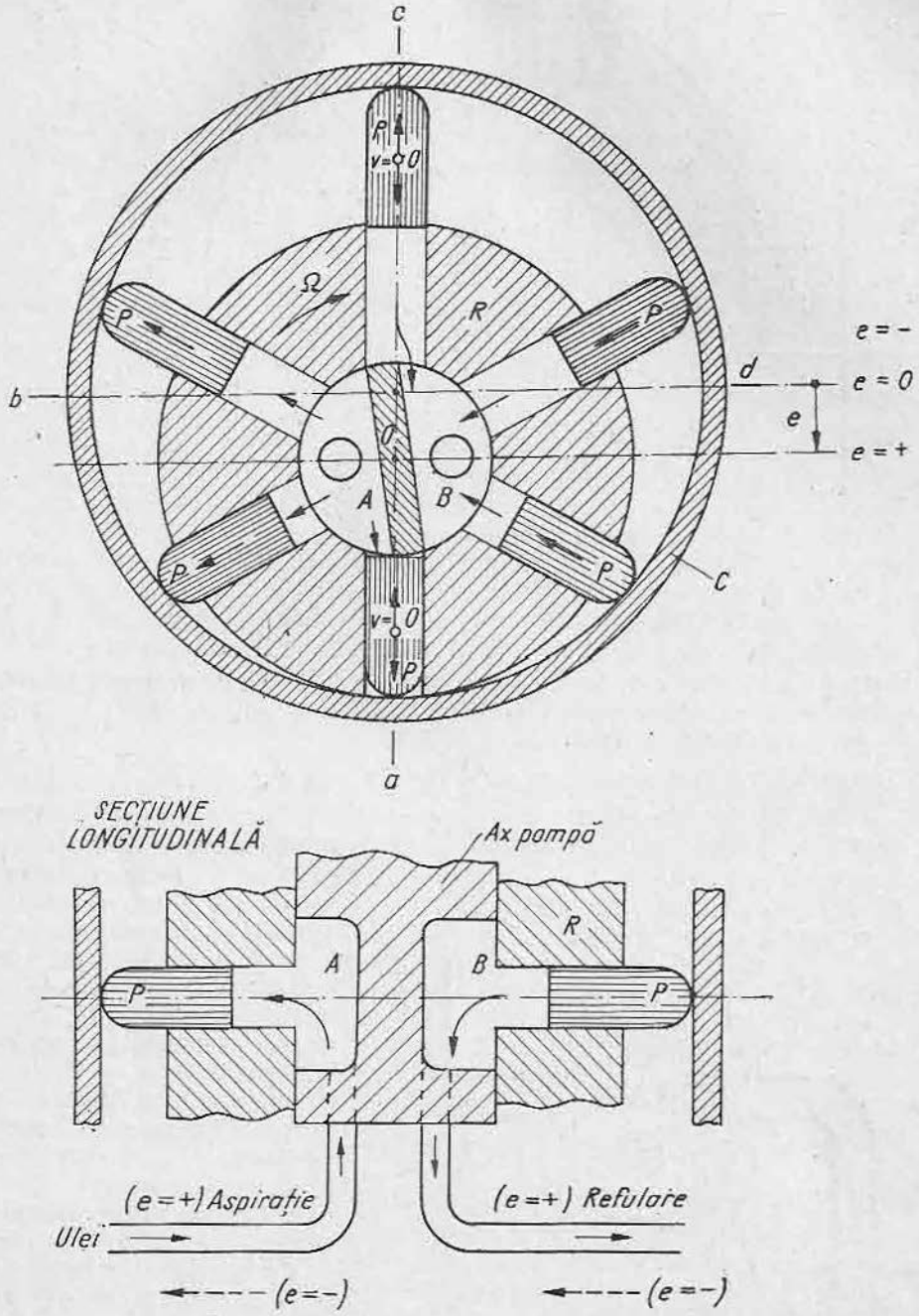


Fig. 17.3. Pompă (generator) hidraulică cu debit variabil și pistoane radiale.

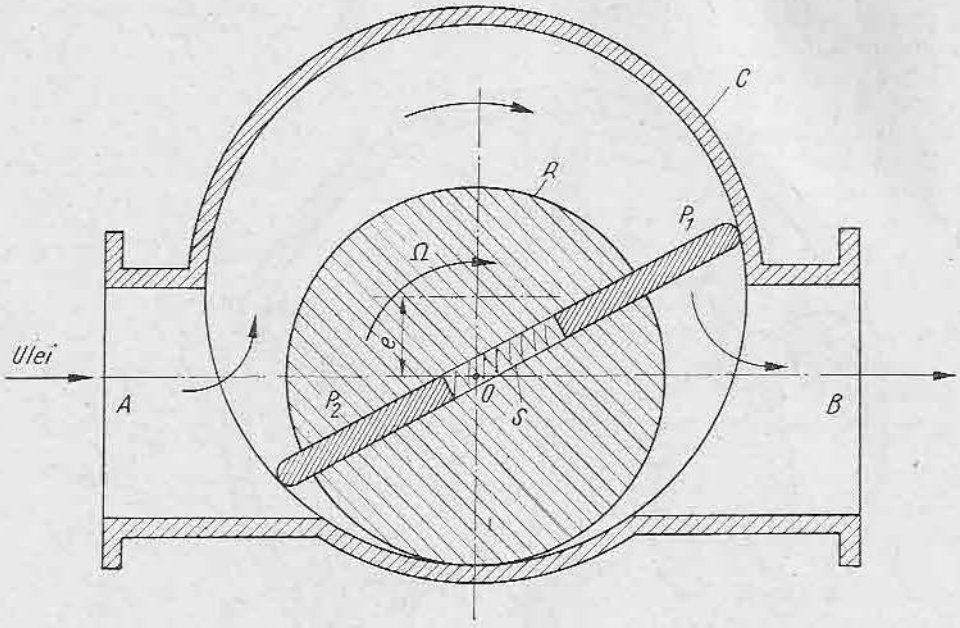


Fig. 17.4. Pompă hidraulică cu debit variabil și palete.

pei este zero, iar cînd e devine negativ (axul rotorului trece deasupra centrului carcasei) compartimentele A și B își inversează rolurile, deci sensul de pompare se schimbă.

În figura 17.4 este prezentată tot o pompă cu debit variabil, însă cu palete. Principial, au fost arătate numai două palete P_1 și P_2 care, alunecînd în rotorul R și fiind împinse radial cu ajutorul resortului spiral S sînt rotite în carcasa C. Datorită excentricității e a rotorului față de carcasă și corespunzător sensului de rotație Ω uleiul este absorbit prin conducta A și refulat în conducta B. Practic, se construiesc pompe cu 4—12 palete.

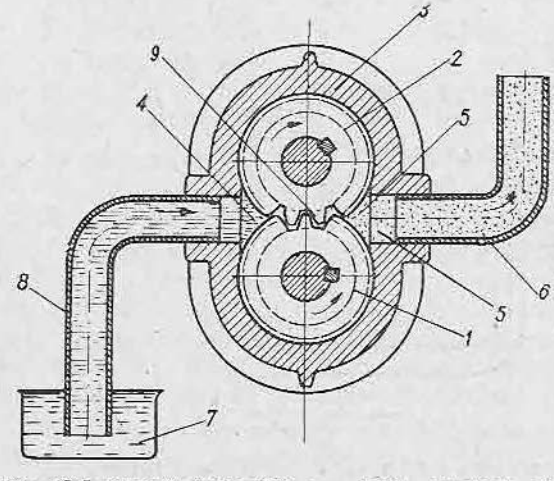


Fig. 17.5. Pompă hidraulică cu debit constant și roți dințate.

Pompa cu roți dințate din figura 17.5 funcționează la presiuni înalte ($p_{max} = 500$ atm) însă la debit constant.

La rotirea roților dințate identice *1* și *2* închise în carcasa *3* se produce o rarefiere în camera de aspirație *4* și o presiune în camera de refulare *5*. În acest mod, uleiul din rezervorul *7* este absorbit prin

conducta *8* și transportat pe periferia pompei de către dinții angrenajelor, pentru ca apoi să fie comprimat și refulat prin conducta *6*.

3. MOTOARE HIDRAULICE

Toate pompele prezentate sînt reversibile în sensul că, fiind alimentate cu ulei sub presiune, transformă energia acestuia în lucru mecanic, adică devin motoare hidraulice.

Practic, deși mașinile hidraulice sînt reversibile, ca și mașinile electrice, totuși, similar cu acestea, se construiesc în mod special motoare hidraulice. Astfel în figura 17.6 este arătat un motor hidraulic cu mișcare circulară și pistoane axiale și cu disc fix. Blocul cilindrilor *1* se rotește solidar cu axul *2* al motorului astfel că cele nouă pistoane se deplasează axial în mod succesiv alunecînd pe discul înclinat *3* care are o înclinare fixă. Uleiul sub presiune intră prin orificiul din partea inferioară, împingînd axial pistoanele, care, pentru a-și mări volumul cilindric, sînt obligate să alunece pe discul *3*, adică să rotească blocul cilindrilor *1*, deci axul *2*.

Motoarele hidraulice cu mișcare liniară sînt realizate sub forma unor pistoane ce se deplasează liniar în cilindri.

Ca exemplu, în figura 17.7 este prezentat un motor hidraulic cu distribuitor. Tija de comandă t_i de la „intrarea" I deplasează sistemul de pistoane P_1 și P_2 din distribuitorul liniar D (sertăraș), alimentînd prin conductele d_1 sau d_2 pistonul principal P aferent motorului hidraulic liniar propriu-zis. Cînd tija t_i se deplasează în sus (ca în figură) uleiul aflat sub presiunea P_a este condus prin orificiul O_1 și conducta d_1 în cilindrul N pe partea superioară a pistonului P, împingîndu-l pe acesta în jos și acționînd astfel și tija t_e de la „ieșirea" E a motorului. Uleiul aflat sub pistonul P este evacuat din cilindru prin conducta d_2 și orificiul O_2.

Cînd t_i se deplasează în jos astfel că pistonul P_1 coboară sub orificul O_1 iar P_2 coboară sub O_2, uleiul sub presiune este pus în legătură cu conducta d_2 împingînd pistonul motorului în sus; uleiul uzat din partea superioară a pistonului respectiv fiind evacuat prin conducta d_1, pe deasupra pistonului P_1 al sertărașului. Cînd tija t_i se află într-o poziție mediană, pistoanele P_1 și P_2 închid orificiile O_1 și respectiv O_2 astfel că pistonul P și tija t_e se oprește în poziția în care s-au aflat.

Deoarece forța mecanică obținută la ieșire E este incomparabil mai mare (amplificată) față de forța aplicată la intrarea I (forța necesară acționării sertărașului), acest ansamblu: distribuitor-motor hidraulic liniar mai poartă numele de *amplificator hidraulic cu distribuitor*.

4. APARATE HIDRAULICE

În circuitele sistemelor de acționare hidraulice se întîlnesc o serie de aparate avînd funcții similare celor folosite în circuitele electrice. Astfel se întîlnesc: distribuitoare (sertărașe), vane, supape etc. Distribuitoarele (omoloage întreruptoarelor electrice) asigură stabilirea sau întreruperea circulației de ulei în anumite conducte. Ca exemplu, în figura 17.8 este prezentat un distribuitor rotativ cu cep conic care cuprinde corpul *1* (din oțel sau fontă) de formă conică în care se introduce cepul (axul) conic *3* (din bronz) etanșarea între

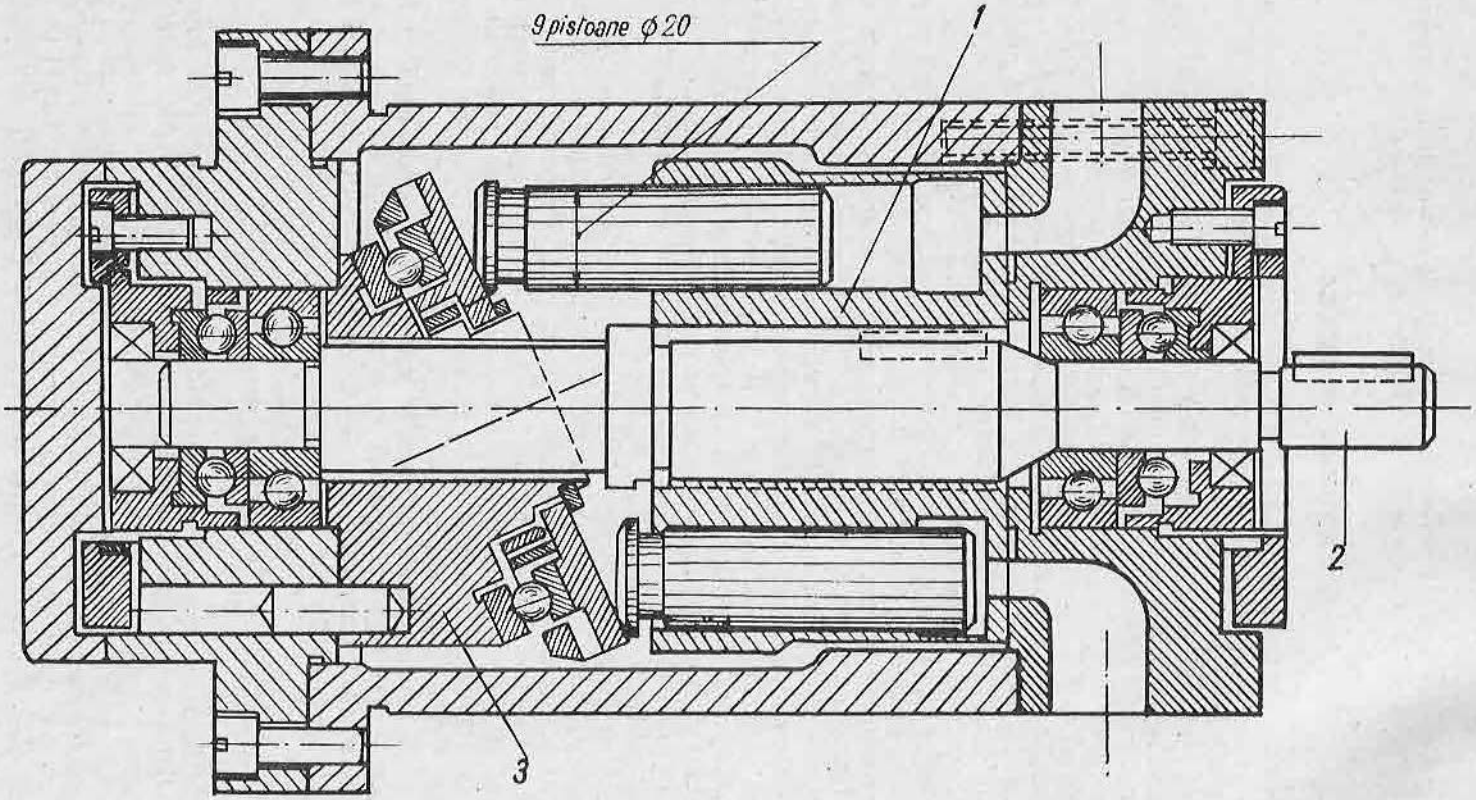


Fig. 17.6. Motor hidraulic cu pistoane axiale şi disc fix.

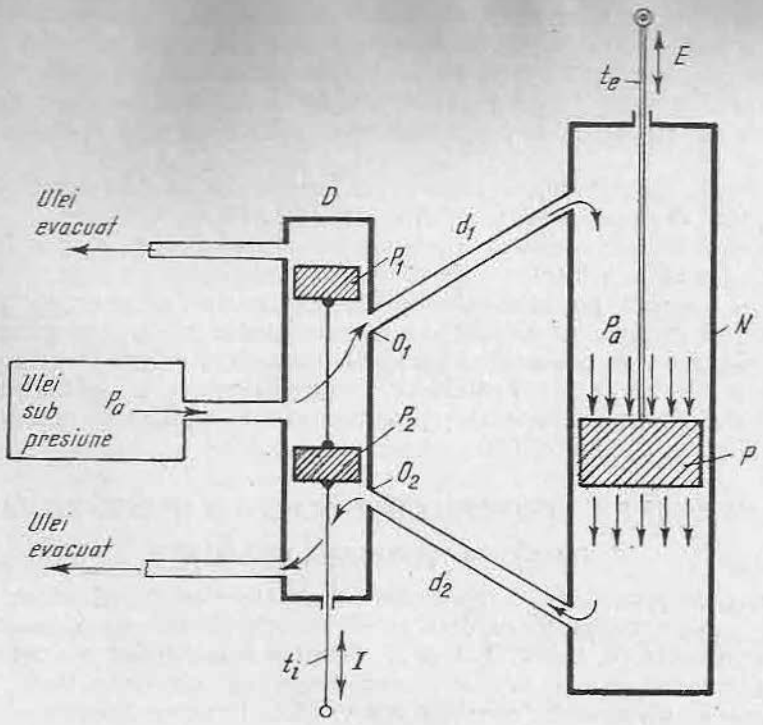


Fig. 17.7. Motor hidraulic („amplificator") liniar cu distribuitor.

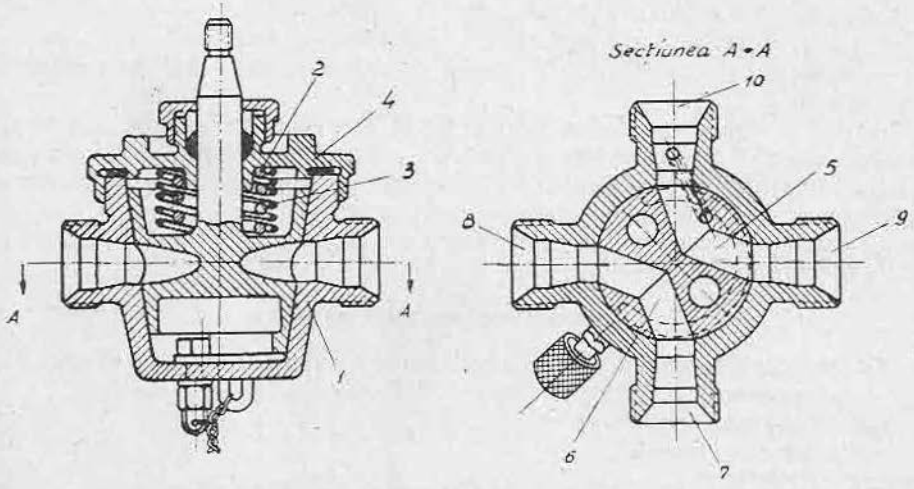


Fig. 17.8. Distribuitor rotativ cu cep (ax) conic.

suprafețele conice, identice ale cepului și corpului fiind asigurată prin resortul spiral *3* care se sprijină pe capacul *4*. Trecerea uleiului se realizează prin canalele *5* și *6* (secțiunea *A-A*) care într-o poziție permite circulația uleiului între orificiile *7* și *8* respectiv *9* și *10*, iar în altă poziție, prin rotirea cepului cu 90° circulația se poate face între orificiile *7* și *9* și respectiv *8* și *10* (fig. 17.16).

Sertărașele (distribuitoare liniare) au funcții similare cu distribuitoarele rotative, însă deplasarea lor este liniară (v. fig. 17.7).

Supapele sînt elemente care asigură deschiderea unui circuit hidraulic atunci cînd presiunea într-un sens de circulație depășește o anumită valoare. Funcțional, supapele pot avea rol de protecție („supapă de siguranță") deschizînd circuitul atunci cînd presiunea prea mare poate produce avarierea instalației respective; de asemenea, supapele asigură circulația unidirecțională (ca o diodă electrică) într-o conductă, reținînd deplasarea lichidului în sens invers. În afara acestor aparate, în acționările hidraulice se mai întîlnesc: relee hidraulice, conducte, filtre, rezervoare etc.

C. ELEMENTELE SISTEMELOR DE ACȚIONARE PNEUMATICĂ

1. STRUCTURA SISTEMELOR PNEUMATICE

Schema de principiu a acționărilor pneumatice este similară cu a celor hidraulice: generator-motor-sarcină cu observația că ele se realizează numai cu circuit deschis (v. fig. 17.2, *b* și *c*). Agentul motor folosit în sistemele de acționări pneumatice este, de obicei, aerul comprimat la presiuni de 5 ... 6 atm.

Acționările pneumatice prezintă următoarele avantaje specifice în raport cu cele hidraulice:

— precizia de executare a pieselor componente este mai redusă;

— se pot folosi în medii explozive sau cu pericol de incendiu;

— rapiditatea acționării mecanismelor comandate datorită destinderii bruște a aerului comprimat;

— funcționarea la temperaturi scăzute, neexistînd pericol de congelarea sau sporirea viscozității agentului motor.

Similar, dezavantajele acționărilor pneumatice sînt:

— datorită compresibilității gazelor, presiunile, deci forțele realizabile, sînt mai mici;

— prin comprimare și destindere rapidă (transformări adiabatice) temperatura variază * fapt care implică necesitatea unor instalații de răcire a gazului (la comprimare) și posibilitatea condensării vaporilor de apă din aer (la destindere), apa fiind agent corosiv pentru instalație;

— gazele nu au proprietatea de ungere a pieselor în mișcare, ceea ce impune o întreținere suplimentară.

2. GENERATOARE PNEUMATICE

Generatoarele pneumatice sînt similare celor hidraulice și se clasifică astfel:

— compresoare cu piston;

— compresoare rotative;

— turbocompresoare.

* Conform relației $pV = RT$, în care p este presiunea, V — volumul molar, R — constanta gazelor și T — temperatura absolută pentru gazul respectiv.

● **Compresoarele cu piston** (fig. 17.9) cuprind pistonul P care deplasîndu-se în jos în cilindrul C absoarbe aerul din conducta A prin supapa S_A, iar la deplasarea în sus îl comprimă și îl refulează în conducta R (supapa S_A se închide) prin supapa S_R care se deschide la creșterea presiunii.

Compresoarele în cascadă sînt realizate din mai multe compresoare monocilindrice acționate de un ax comun la care refularea unei trepte corespunde cu admisia în treapta următoare fapt, care asigură presiuni mari de aer (20 ... 30 atm).

● **Compresoarele rotative** (fig. 17.10) sînt compuse dintr-un stator cilindric și un rotor cilindric cu o serie de palete plasate oblic în niște crestături ale rotorului. În funcționare, datorită forțelor centrifuge, paletele sînt proiectate spre periferie, absorbind aerul din galeria de admisie și comprimîndu-l în camera de ieșire. Compresorul respectiv este răcit cu apă.

● **Turbocompresoarele** de asemenea rotative, sînt generatoare pneumatice pentru debite mari (3 000 — 4 000 m³/min) și presiuni relativ mici ($p < 6$ atm) funcționînd la puteri și turații mari.

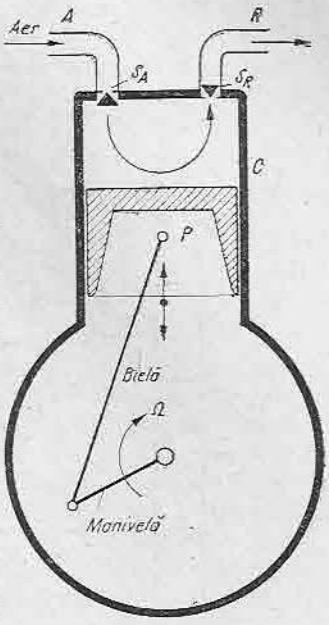


Fig. 17.9. Compresor cu piston.

3. MOTOARE PNEUMATICE

Motoarele pneumatice pot fi: *rotative* și *liniare*, acestea din urmă putînd fi: *cu piston* sau *cu membrană*.

Motoarele pneumatice rotative se realizează de obicei cu palete, fiind principial identice cu compresoarele rotative (v. fig. 17.10).

Motoarele pneumatice liniare cu piston sînt folosite în cazul cînd sînt necesare deplasări mai mari. În figura 17.11 sînt prezentate într-o formă principială asemenea motoare care pot fi executate în două variante constructive: cu o față a pistonului activă și cu ambele fețe active. În prima variantă (fig. 17.11, *a*) aerul comprimat intră prin orificiul A în cilindrul C și împinge în jos pistonul P solidar cu tija T, comprimînd în același timp resortul spiral R. Pentru o anumită constantă de elasticitate K a resortului deplasarea Δl depinde de forța F care acționează asupra pistonului:

$$\Delta l = KF \tag{17.1}$$

respectiv, de presiunea p a aerului care acționează asupra pistonului de suprafață S:

$$F = pS. \tag{17.2}$$

Din relațiile (17.1) și (17.2) rezultă:

$$\Delta l = KSp = K_0 p. \tag{17.3}$$

În varianta a doua (fig. 17.11, *b*) poziția tijei T depinde de diferența de presiune ($\Delta p = p_1 - p_2$) între cele două fețe ale pistonului P, respectiv de

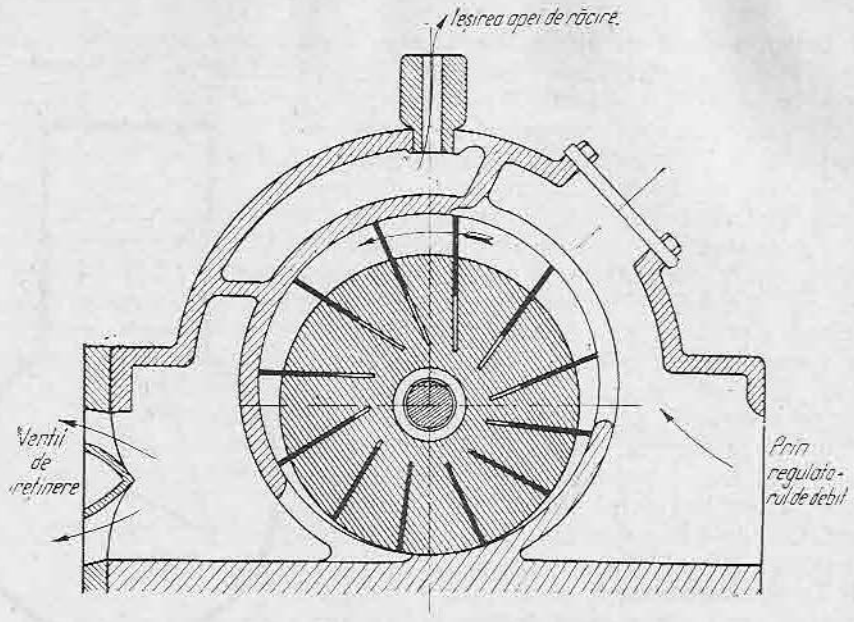


Fig. 17.10. Compresor rotativ cu palete.

diferența de presiune a aerului comprimat adus prin conductele A_1 și A_2. Acest tip de motor este folosit în cazul în care sînt necesare forțe de acționare egale în ambele sensuri de deplasare. Asemenea tipuri de motoare sînt folosite și în acționările hidraulice.

Motoarele pneumatice liniare cu membrană (fig. 17.12) sînt formate dintr-o capsulă manometrică rotundă C prevăzută cu o membrană elastică M. Sub membrană se află un disc metalic D solidar cu tija T prin care se transmite mișcarea și un resort antagonist R. Aerul comprimat admis prin orificiul A acționează asupra membranei și, învingînd rezistența resortului anta-

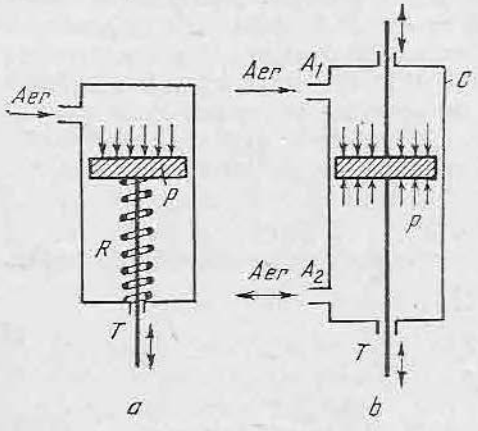


Fig. 17.11. Motor pneumatic cu piston:
a — cu o față a pistonului activă;
b — cu ambele fețe active.

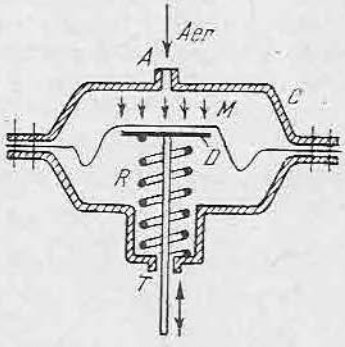


Fig. 17.12. Motor pneumatic cu membrană.

gonist, împinge tija în jos. Ca și în cazul precedent poziția (deplasarea) tijei depinde de presiunea aerului comprimat. Aerul comprimat are de obicei o presiune de 0,2 ... 1 atm, iar cursa tijei este de 1—6 cm.

4. APARATE PNEUMATICE

Sînt identice ca funcțiuni cu cele folosite la acționările hidraulice: *distribuitoare, sertărașe, supape, conducte, filtre* etc.

D. SURSE DE ALIMENTARE

În funcție de complexitatea sistemului de acționare hidraulică sau pneumatică, pentru producerea agentului motor (ulei sau aer comprimat) se folosește în cazul cel mai general o instalație completă, denumită, ca și în cazul acționărilor electrice, *sursă de alimentare*.

Se vor distinge așadar surse de alimentare hidraulice, respectiv pneumatice, care să asigure uleiul sub presiune, sau aerul comprimat la parametrii impuși de acționarea respectivă.

Pentru ambele cazuri, sursele de alimentare (hidraulice sau pneumatice) se realizează sub forma a două tipuri diferite și anume:

- **Surse pentru alimentarea elementelor de măsurare, comandă, reglare** (de exemplu traductoare, amplificatoare, regulatoare etc.), caz în care interesează *valoarea informațională* a presiunii uleiului sau a aerului comprimat. Aceste surse se caracterizează prin presiuni mici și puteri reduse.

- **Surse pentru alimentarea motoarelor pneumatice,** caz în care interesează *valoarea energetică* (puterea) a presiunii uleiului sau aerului comprimat. Aceste tipuri de surse care interesează în cazul de față sînt caracterizate prin presiuni și puteri mari.

Trebuie precizat faptul că pentru ambele tipuri de surse arătate mai sus structurile principale ale acestora sînt, în linii generale, aceleași și ele vor fi descrise mai jos.

1. SURSE HIDRAULICE

În figura 17.13 este prezentată schema de principiu a unei surse de alimentare cu ulei sub presiune. Pompa cu roți dințate P (v. fig. 17.5) acționată de motorul electric M absoarbe uleiul dintr-un rezervor R cu „suprafața liberă" adică la presiune atmosferică, printr-un filtru F_1 și îl împinge într-un rezervor sub presiune A numit *conservator* sau *acumulator de ulei*. În calea sa uleiul străbate filtrul de ieșire F_2, clapeta antiretur C (supapă care asigură circulația unidirecțională a uleiului) și vana (ventil) de intrare V. Rezervorul A este separat de o membrană elastică E în două compartimente (*1* și *2*) în care se află ulei, respectiv aer comprimat adus de la un compresor prin vana V_B. În acest mod, aerul fiind compresibil asigură presiunea necesară uleiului, presiune care altfel nu ar fi putut fi realizată, uleiul (ca în general toate lichidele) fiind incompresibil.

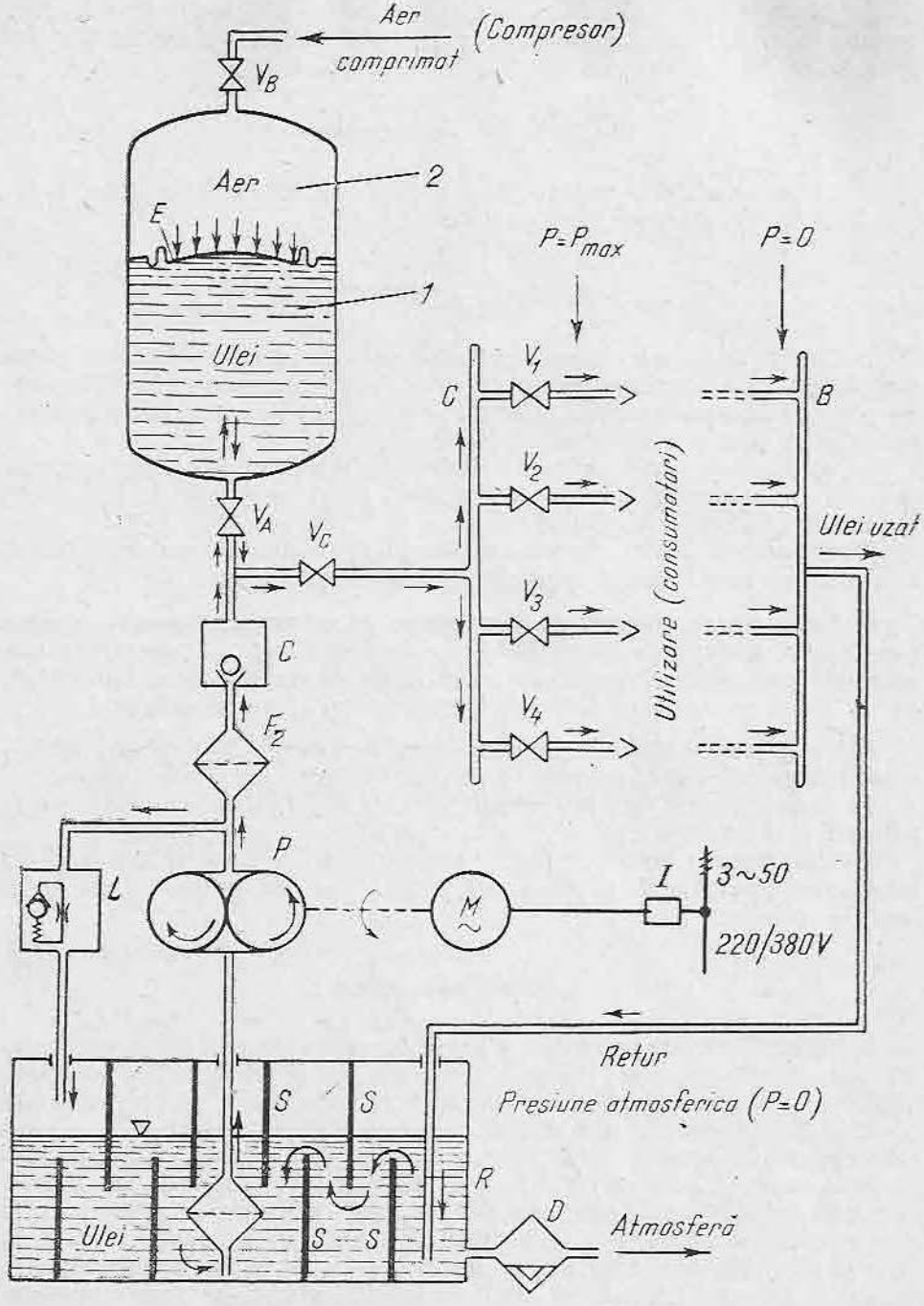


Fig. 17.13. Schema principială a unei surse hidraulice.

În adevăr, un fluid incompresibil (în speță uleiul) nu poate asigura astfel o presiune de lucru chiar dacă la un moment dat s-ar afla într-un recipient rigid (fără variația de volum) și la presiunea dorită (de pildă 30 atm), deoarece cel mai mic consum de ulei ar face ca presiunea să scadă practic la zero, după cum cel mai mic volum de ulei introdus în rezervor ar face să crească brusc presiunea acestuia.

Uleiul sub presiune este transmis prin vana V_3 la o „bară de distribuție" C de la care, printr-o serie de vane individuale V_1, V_2, ..., este trimis la „utilizare" (diverse motoare de acționare hidraulică).

Uleiul „uzat", adică aflat practic la presiunea atmosferică, este colectat pe o bară B (conductă) și prin conducta de „retur" este adus înapoi în rezervorul R de unde își reia circuitul.

Rezervorul R mai cuprinde o serie de pereți verticali S parțial despărțitori, alternînd sus și jos, care constituie „șicane" în drumul uleiului de la retur la filtrul de absorbire F_1.

Acest lucru asigură decantarea (depunerea) particulelor solide care se formează în ulei.

O vană de fund D permite eliminarea (purjarea) reziduurilor solide din ulei în atmosferă.

Sistemul mai este prevăzut la ieșirea din pompă cu o vană de strangulare cu supapa de siguranță L care îndeplinește următoarele funcțiuni:

— conduce înapoi în rezervor surplusul de ulei pompat atunci cînd consumul de ulei este redus *;

— deschide brusc supapa de siguranță care asigură circulația uleiului înapoi în rezervorul R, atunci cînd presiunea sa atinge o valoare inadmisibilă.

2. SURSE PNEUMATICE

În figura 17.14 este prezentată schema principială a unei surse pneumatice. Compresoarele — generatoarele pneumatice — C_1, C_2 antrenate de motoarele electrice M_1, M_2 absorb aerul din atmosferă printr-un filtru F_1, refulîndu-l prin schimbătoarele de căldură S_1, S_2, vanele V_1, V_2 și un filtru F_2 în rezervorul (tampon) de aer R.

Schimbătoarele de căldură (răcitoarele) răcite cu apă cu rolul de a prelua căldura degajată de aerul comprimat (adiabatic) la ieșirea din compresoare.

Rezervorul asigură o anumită rezervă de aer (tampon) în perioada în care compresoarele nu funcționează, motoarele electrice fiind comandate (pornite-oprite) prin releele pneumatice P_1, P_2 alimentate chiar cu aer din rezervor **.

Rezervorul respectiv este prevăzut cu un ventil de curățire E „purjor" în atmosferă și cu o supapă de siguranță A „eșapare rapidă" care se deschide în atmosferă în cazul unei presiuni periculoase în rezervor. Din rezervor aerul comprimat este trimis printr-o vană V_3 și un filtru F_3 printr-o coloană de uscare (U_1 sau U_2) către conducta de utilizare C.

Coloanele de uscare au rolul de a elimina vaporii de apă din aer care au fost absorbiți din atmosferă odată cu aerul.

---

* Evident, pompa (generatorul) P, care funcționează continuu, trebuie să asigure debitul necesar de ulei în cazul consumului maxim.

** În acest mod se asigură pornirea motocompresoarelor cînd presiunea scade (de exemplu $p < 1{,}4$ atm) și oprirea acestora cînd presiunea depășește o anumită valoare ($p > 1{,}6$ atm).

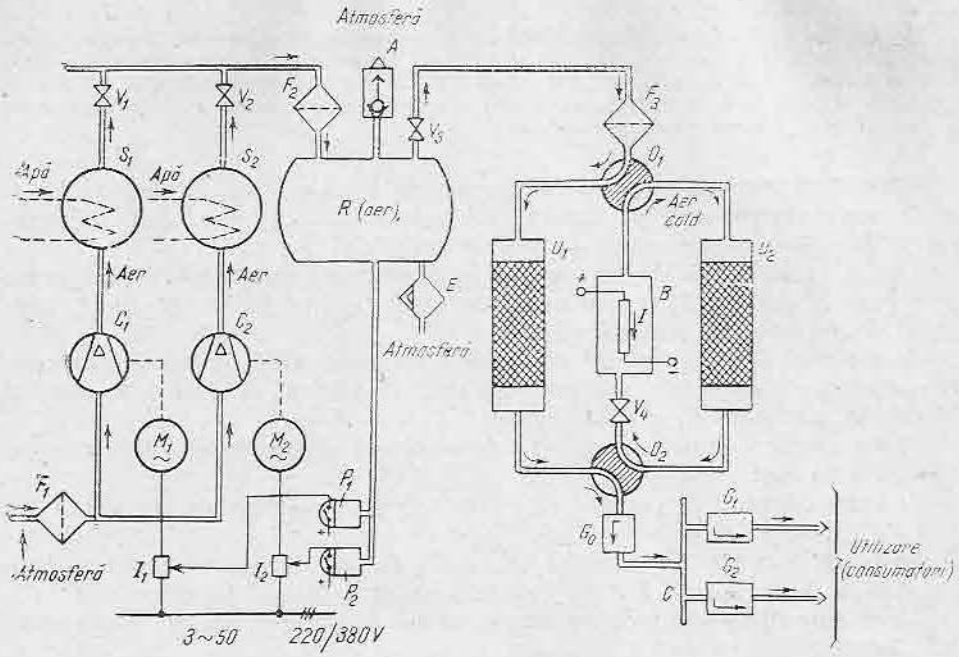


Fig. 17.14. Schema principială a unei surse pneumatice.

Uscarea aerului se realizează de obicei pe cale chimică folosind substanțe absorbante cum ar fi de exemplu oxidul de siliciu sau alumina.

Atenție! Prezența vaporilor de apă sau a condensului în aerul comprimat riscă să înfunde unele orificii sau să producă coroziunea metalelor din instalație.

Cu ajutorul unor distribuitoare cu două căi (D_1 și D_2) (v. fig. 17.8) aerul este trecut printr-una din coloanele de uscare U_1 cuprinzînd oxidul de siliciu, în timp ce cealaltă U_2 este „regenerată" prin suflarea cu aer cald de la un cuptor electric B. Prin manevrarea simultană a celor două distribuitoare cele două coloane își inversează funcțiile. La intrarea pe barele de distribuție C precum și pe fiecare conductă de alimentare a consumatorilor se prevăd „regulatoare directe" de presiune G_0, G_1, G_2 care asigură o presiune p_0 constantă la utilizare (de exemplu $p_0 = 1{,}4$ atm).

După folosire, aerul uzat este eliminat în atmosferă.

E. EXEMPLE DE ACȚIONĂRI HIDRAULICE ȘI PNEUMATICE

● În figura 17.15 este prezentată principial **schema de acționare a unei prese hidraulice.** Uleiul sub presiunea p_1 (de exemplu $p_1 = 300$ atm) obținut de la sursa de alimentare este refulat prin distribuitorul D (canalul *1—2*) în cilindrul C al motorului liniar M.

Pistonul P deplasează platforma F, comprimînd (presînd) sarcina S. În același timp uleiul uzat este condus prin distribuitor (canalul *3—4*) înapoi la sursă. Prin rotirea cu 90° a distribuitorului D (canalele *1 — 3* și *2 — 4*) motorul liniar se deplasează invers.

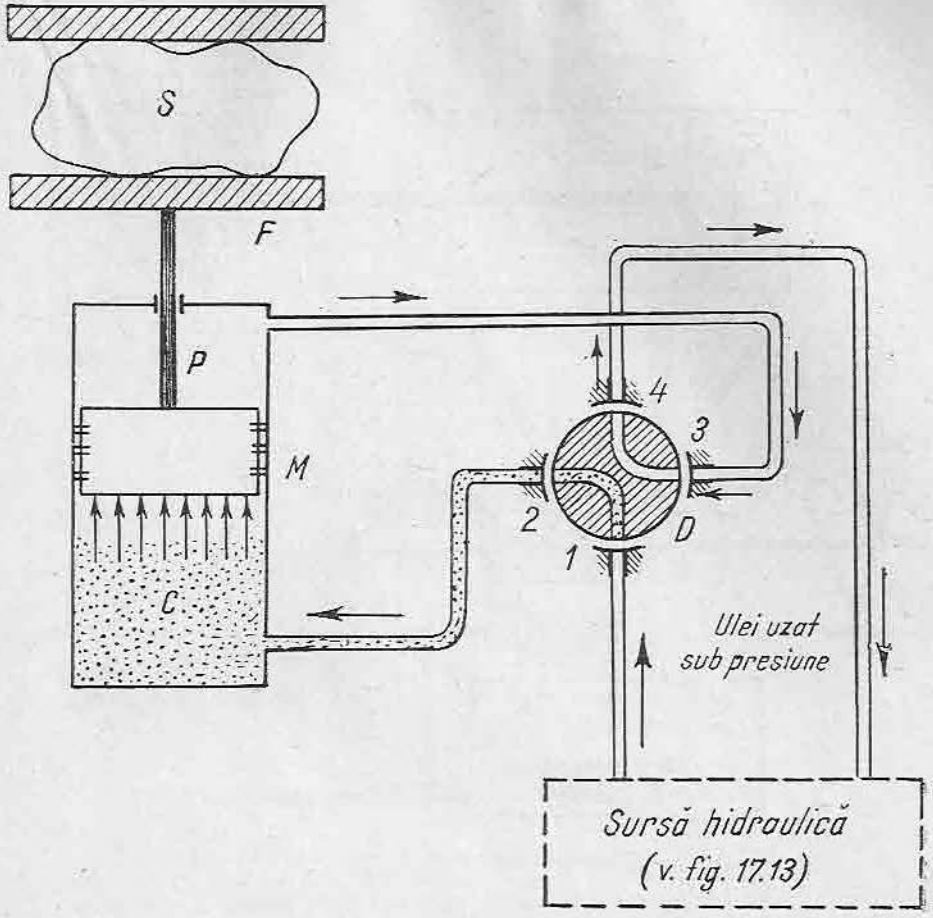


Fig. 17.15. Acționarea unei prese hidraulice.

● În figura 17.16 este prezentată o **schemă de acționare pneumatică a unui separator electric.** Prin manevrarea manetei *M* în poziția „închis" sertărașul *S* (distribuitor liniar) se deplasează ca în figură, aerul comprimat din rezervorul *R* trece prin compartimentul *1* în conducta *I* și împinge pistonul *P* în cilindrul *C* acționînd la închidere separatorul *E*. Se observă că aerul din spatele pistonului este evacuat în atmosferă prin conducta *D* și compartimentul *2*.

La manevrarea manetei *M* în sens invers (deschis) deplasarea sertărașului este inversă (desenată punctat), iar pistonul *P* este acționat invers producînd deschiderea separatorului.

Observație. Exemplul cu separatorul reprezintă un caz din multe altele; este ușor de observat că în locul cuțitului separatorului se putea afla un organ de mașină cu o mișcare similară, de exemplu: ușa unui cuptor, o paletă de

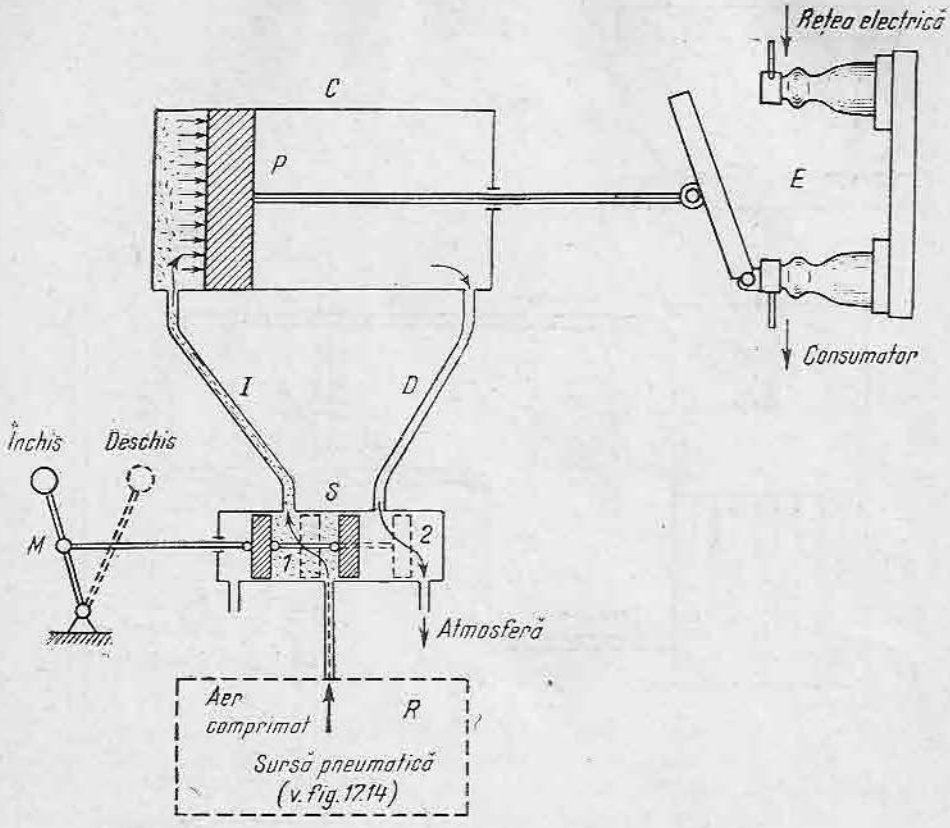


Fig. 17.16. Acționarea pneumatică a unui separator electric.

reglare în circuitul unui fluid, cîrma unui vas etc. De asemenea, în locul aerului comprimat se putea folosi ulei sub presiune, același exemplu fiind valabil și pentru o acționare hidraulică, cu observația că uleiul uzat trebuie recuperat.

● În figura 17.17 este arătată o **acționare pneumatică pentru strîngerea (fixarea) unei piese S.** În poziția din figură a distribuitorului D, aerul din rezervorul R al sursei de aer comprimat este adus prin conducta a în compartimentul *1* al cilindrului C împingînd în sensuri opuse pistoanele P_1 și P_2. Prin tijele t_1 și t_2 pistoanele deplasează lateral „penele" P_1 și P_2 acționînd în sus rolele B_1 și B_2*. Pîrghiile C_1 și C_2 acționează strîngînd** cu forța $F_1 = F_2$ piesa S.

● În unele cazuri, pentru a îmbina avantajele sistemelor hidraulice și ale celor pneumatice se folosesc sisteme de acționare *mixte* (hidraulice + pneu-

* Se observă că se obține o multiplicare mecanică a forței prin reducerea corespunzătoare a deplasării (astfel ca lucrul mecanic să se conserve).

** Se obține o nouă multiplicare a forței mecanice.

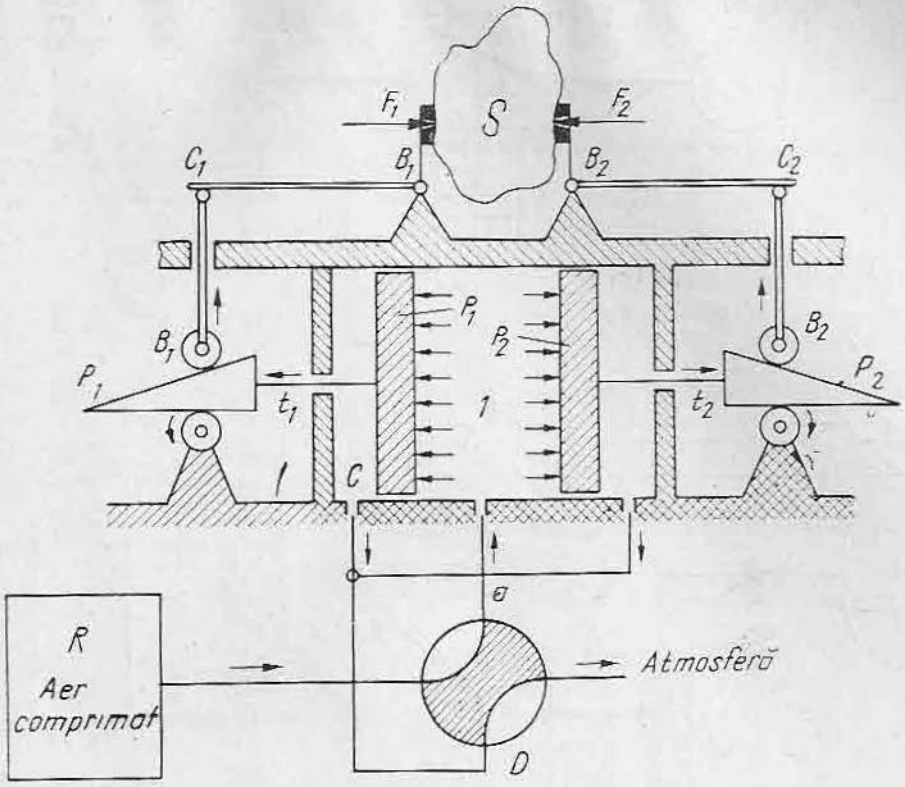


Fig. 17.17. Acționare pneumatică pentru fixarea unei piese.

matice) numite și *sisteme oleopneumatice*. Astfel, de exemplu, în figura 17.18 este prezentat un **sistem de acționare oleopneumatic (tip MOP) folosit la comanda întrerupătoarelor de 110 kV, 220 kV și 400 kV de tip I.O.**, fabricate la Întreprinderea Electroputere — Craiova.

Pompa (generatorul) de ulei P acționată de motorul electric M absoarbe uleiul uzat și îl împinge în acumulatorul de energie A (realizat sub forma unui cilindru cu piston), precum și în rezervorul tampon T aflat în derivație. Presiunea înaltă a uleiului (circa 300 atm) este realizată cu ajutorul unei butelii B conținînd azot sub presiune ($p > 300$ atm) ce acționează asupra pistonului E din acumulatorul A. Uleiul sub presiune este adus la intrarea „electroventilelor" de comandă V_I și V_D. Pentru închiderea întrerupătorului I de înaltă tensiune este comandată electric de la distanță bobina (motor solenoidal — v. fig. 18.5) prin butonul de comandă O_I, ceea ce are ca efect deschiderea ventilului V_I. Uleiul sub presiune pătrunde prin conducta C_I și împingînd în jos pistonul motorului liniar L (v. fig. 17.11, *b*) produce închiderea întrerupătorului I.

Totodată, prin conducta K_I este acționat tot cu ulei sub presiune releul hidraulic S care închizînd contactul electric E_I aprinde lampa L_I semnalizînd

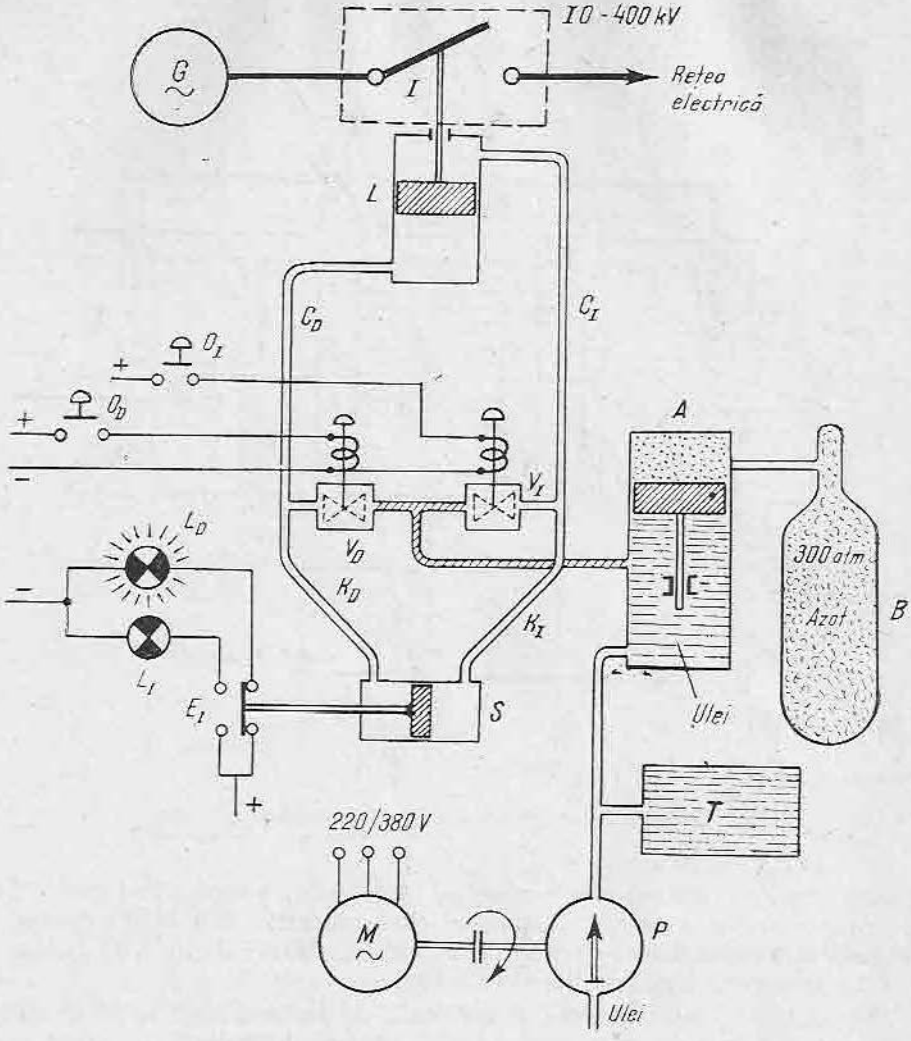


Fig. 17.18. Sistem de acționare oleopneumatic al întrerupătorului I.O. 110—400 kV.

astfel „întrerupător închis". Similar, comanda electrică de declanșare dată prin butonul O_D și bobină produce deschiderea electroventilului V_D și trimiterea uleiului sub presiune la motorul L care este acționat în sens invers, producînd deschiderea întrerupătorului I. Concomitent, prin conducta K_D este acționat în sens invers și releul de semnalizare S care prin închiderea contactului electric E_D aprinde lampa L_D, indicînd astfel „întrerupător deschis".

Constructiv, dispozitivul de acționare oleopneumatică prezentat mai cuprinde o serie de elemente care blochează manevrarea întrerupătorului în anumite condiții, ca de pildă: presiunea azotului este redusă, cantitatea de ulei este insuficientă etc.

REZUMAT

● Ca și acționările electrice, acționările hidraulice (pneumatice) cuprind următoarea succesiune de elemente hidraulice (pneumatice).

GENERATOR (pompă) — APARATE — MOTOR-SARCINĂ

● La majoritatea acționărilor hidraulice (pneumatice) generatoarele sînt antrenate de motoarele electrice și uneori de motoarele diesel (de exemplu locomotiva diesel-hidraulică).

● Avantajele principale ale sistemelor hidraulice constă în obținerea unor forțe mecanice mari eliminînd unele organe suplimentare din instalație.

● Avantajele principale ale sistemelor pneumatice constă în folosirea lor în medii explozive și la orice temperatură a mediului ambiant.

● Dezavantajele sistemelor hidraulice și pneumatice rezidă în costurile de investiție și întreținere suplimentare.

VERIFICAREA CUNOȘTINȚELOR

1. Acționările pneumatice se realizează:
   a — numai cu circuit închis?
   b — numai cu circuit deschis?
   c — cu circuit deschis sau închis?

2. Acționările pneumatice prezintă față de cele electrice următorul avantaj principal:
   a — simplifică și deci ieftinește instalația în ansamblu?
   b — pot fi folosite în orice mediu?
   c — asigură turații mai mari mașinilor antrenate?

3. Pompa hidraulică cu roți dințate poate asigura:
   a — debite mari în circuite?
   b — presiuni și debite variabile?
   c — presiuni mari?

4. Acționările hidraulice prezintă față de cele pneumatice următorul avantaj:
   a — realizează viteze de lucru mai mari?
   b — nu sînt supuse la îngheț?
   c — asigură forțe mai mari?

Capitolul 18

ELEMENTE DE EXECUȚIE

A. NOȚIUNI GENERALE

După cum rezultă chiar din denumirea sa, elementul de execuție are rolul de a interveni într-o instalație tehnologică pentru a modifica unul sau mai mulți parametri ce caracterizează instalația respectivă. De exemplu, deschiderea sau închiderea unei vane sau ventil într-o conductă poate modifica debitul de fluid din acea conductă (și implicit cantitatea totală de materie transferată) eventual, presiunea realizată etc.

De asemenea, închiderea sau deschiderea unui întrerupător într-o rețea electrică sau deplasarea cursorului unui reostat în circuitul de excitație al unui generator sincron reprezintă exemple de intervenție într-un proces sau instalație tehnologică.

Se poate spune deci că *elementul de execuție reprezintă acea parte (sau acele părți) ale instalației tehnologice prin care se intervine pentru a modifica parametrii din proces.*

Un element de execuție este format dintr-un *organ* (dispozitiv) *de execuție* (ventil, întrerupător, clapetă, reostat etc.) și un *motor de execuție* (numit uneori și servomotor) care acționează asupra organului de execuție.

ELEMENT DE EXECUȚIE = MOTOR + ORGAN (DE EXECUȚIE)

Observația 1. Din punct de vedere structural, organul de execuție face parte integrantă din instalația tehnologică, iar motorul de execuție poate să și lipsească atunci cînd intervenția în instalația tehnologică se face manual, de la fața locului; de exemplu rotirea (deschiderea-închiderea) manuală a unui robinet etc.

Observație 2. Necesitatea intervenției de la distanță sau introducerea automatizării unei instalații tehnologice impune în mod obligatoriu prevederea motoarelor de execuție, adică „acționarea mecanizată" a organelor de execuție.

1. CLASIFICAREA ELEMENTELOR DE EXECUȚIE

Marea diversitate a proceselor și instalațiilor tehnologice a condus la o varietate foarte mare de elemente de execuție, astfel că o clasificare foarte cuprinzătoare este dificil de realizat (fig. 18.1).

S-a convenit ca definirea elementelor de execuție să fie făcută la baza naturii sursei de energie folosită în alimentarea motoarelor de execuție (acționare).

Astfel se disting:

— *elemente de execuție electrice;*
— *elemente de execuție hidraulice;*
— *elemente de execuție pneumatice;*
— *elemente de execuție mixte.*

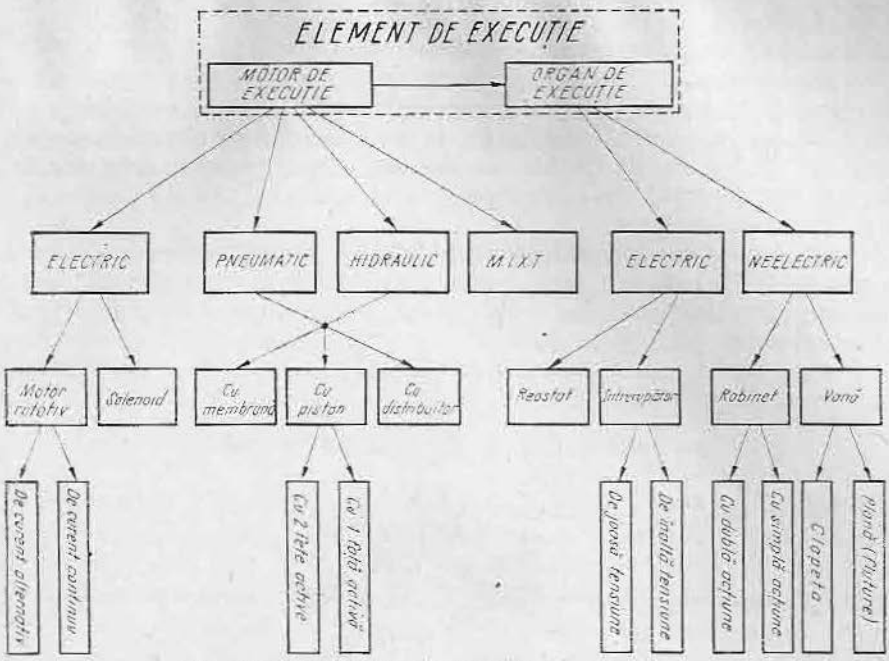


Fig. 18.1. Clasificarea elementelor de execuție.

Motoarele de execuție (servomotoarele) se construiesc astfel încît să se adapteze mișcării necesare organelor de execuție. Se disting servomotoarele cu:

— *mișcare de rotație continuă;*
— *mișcare de rotație limitată (sub 360°);*
— *mișcare de translație (deplasare).*

2. ORGANE DE EXECUȚIE

Organele de execuție sînt realizate, în general, pe baza următoarelor principii de funcționare:

● **Variația debitului (sau a altor parametri) de substanță (energie) prin modificarea secțiunii (rezistenței) de trecere a acestuia.** De exemplu: modificarea debitului unui fluid prin deschiderea mai mult sau mai puțin a unei vane de trecere sau modificarea intensității curentului într-un circuit electric prin deplasarea cursorului unui reostat;

● **Variația debitului (sau a altor parametri) de substanță (energie) prin modificarea cantității de substanță (energie) produsă de o sursă.** De exemplu: modificarea puterii reactive debitată de un generator sincron prin variația excitației acestuia etc.

● Modificarea cantității de substanță (energie) poate fi realizată în două moduri:

— **continuu** — atunci cînd cantitatea respectivă se modifică în mod continuu (printr-o infinitate de valori) între două valori limită. De exemplu, un ventil modifică în mod continuu (printr-o deschidere treptată) debitul

de fluid ce trece printr-o conductă între valoarea zero (ventil închis) și valoarea maximă corespunzătoare ventilului complet deschis;

— **discontinuu** — atunci cînd cantitatea respectivă se modifică discontinuu (discret) numai pentru două valori limită dintre care, de obicei, una este zero („tot sau nimic"). De exemplu, la un întrerupător electric care are numai două poziții stabile (închis sau deschis — rezistența de trecere este *zero* sau *infinită*) curentul din circuit poate avea numai o valoare nominală oarecare sau valoarea zero.

Organele de execuție cel mai des folosite pentru modificarea cantității de substanță (lichide sau gaze) sau a cantității de energie termică, pneumatică sau hidraulică sînt (fig. 18.2):

— **robinetul** (fig. 18.2, *a*);

— **vana plană** (sau **fluture**) (fig. 18.2, *b*);

— **vana clapetă** (fig. 18.2, *c*).

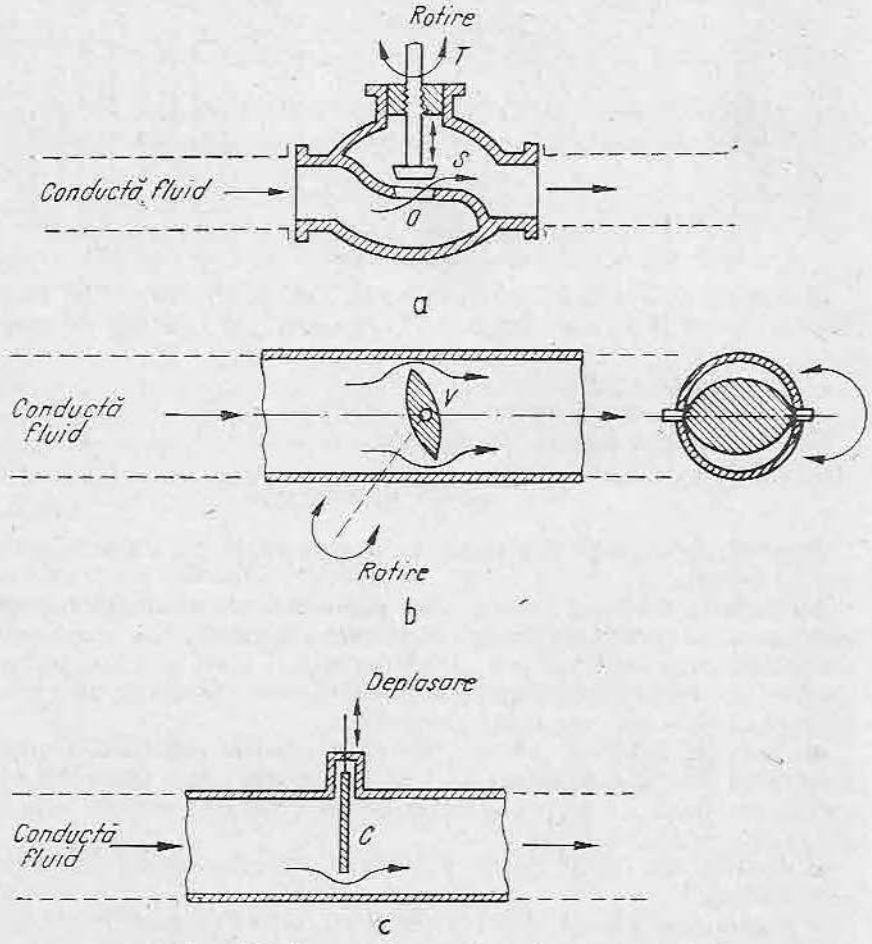


Fig. 18.2. Organe de execuție neelectrice:
a — robinet; *b* — vană plană; *c* — vană clapetă.

Toate aceste organe de execuție pot funcționa în regim continuu sau discontinuu în funcție de motorul de execuție adoptat.

Organele de execuție folosite în instalațiile electroenergetice sînt de obicei: întrerupătoarele, reostatele, mutatoarele electronice și ionice (tiristoare, tiratroane), amplificatoarele magnetice etc.

B. ELEMENTE DE EXECUȚIE ELECTRICE

După cum s-a arătat, aceste tipuri de elemente de execuție necesită motoare de execuție electrică care se împart în două categorii de bază și anume: *cu electromotor* și *cu electromagnet* (solenoid).

1. ELEMENTE DE EXECUȚIE CU ELECTROMOTOR

În principiu se poate folosi în acest scop orice tip de electromotor din seriile curente. Practic, servomotoarele electrice rotative se construiesc în mod special pentru acest scop avînd inclusă în structura lor și un reductor mecanic de turație care reduce turația de 100—200 ori, mărind în schimb cuplul de acționare.

Servomotoarele electrice pot fi: de curent continuu sau de curent alternativ.

Motoarele de curent continuu utilizate sînt de obicei cele cu excitația separată. În acest caz, impulsul de comandă I_c este aplicat pe înfășurarea rotorică (fig. 18.3, *a*), cea de excitație fiind alimentată permanent de la rețea sau, mai rar, se procedează invers (fig. 18.3, *b*). În ambele situații, viteza de rotație depinde de valoarea (mărimea) semnalului de comandă (I_c), iar sensul de rotație, de polaritatea aceluiași semnal.

Motoarele de curent alternativ folosite în mod curent sînt cele asincrone bifazate cu rotorul în scurtcircuit (fig. 18.4) care prezintă următoarele avantaje:

— sînt simple și robuste datorită lipsei colectorului;

— sînt ușor de manevrat în ambele sensuri prin modificarea fazei curenților de comandă I_{c1} și I_{c2}.

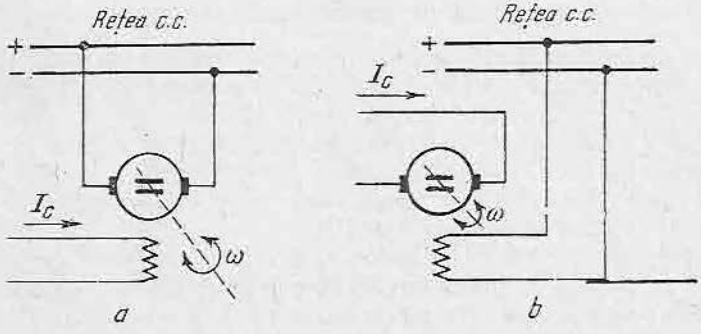


Fig. 18.3. Motor de execuție de curent continuu:
a — cu comandă pe stator; *b* — cu comandă pe rotor.

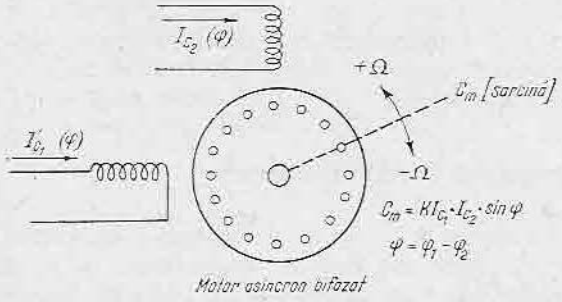


Fig. 18.4. Motor de execuție asincron bifazat.

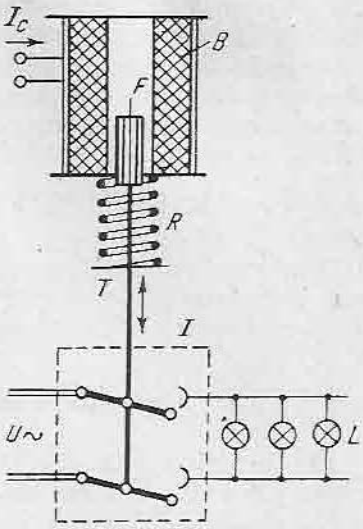


Fig. 18.5. Motor de execuție cu solenoid.

În adevăr, cuplul mecanic C_m activ produs de motor este proporțional cu produsul celor doi curenți de comandă și cu diferența de faza φ a celor doi curenți ($\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$):

$$C_m = KI_{C1}I_{C2} \sin \varphi \tag{18.1}$$

în care K este o constantă de proporționalitate.

Deoarece în condițiile unei sarcini date viteza (turația) depinde de valoarea cuplului activ, rezultă că un asemenea servomotor poate produce comanda unui organ de execuție cu viteză variabilă în funcție de valorile mărimilor I_{C1}, I_{C2} și φ și în sensuri diferite în funcție de semnul cuplului C_m respectiv a termenului $\sin \varphi$.

Curenții de comandă I_{C1} și I_{C2} sînt produși de o schemă electrică adecvată (de exemplu de un regulator automat, electric sau electronic).

2. ELEMENTE DE EXECUȚIE CU SOLENOID

Aceste tipuri de elemente de execuție sînt folosite în cazul acționărilor discontinue bipoziționale: închis-deschis, dreapta-stînga etc. Motorul propriu-zis (fig. 18.5) este realizat sub forma unui electromagnet avînd un miez magnetic mobil F prevăzut cu bobina solenoidală B și un resort antagonist R care menține miezul magnetic într-o poziție limită. Totodată, tija T, solidară cu miezul magnetic F, acționează asupra organului de execuție concretizat sub forma întrerupătorului I.

Cînd se aplică curentul de comandă I_c electromagnetul se excită, iar miezul magnetic este atras și, învingînd rezistența resortului antagonist, comandă închiderea întrerupătorului I (implicit aprinderea, de exemplu, a lămpilor L). La întreruperea curentului prin bobină, resortul R fiind „armat" (comprimat) readuce brusc tija T în poziția inițială deschizînd întrerupătorul I.

C. ELEMENTE DE EXECUȚIE HIDRAULICE

Elementele de execuție hidraulice au în structura lor motoare de acționare hidraulice de tipul celor descrise în capitolul 17 și anume: cu membrană, cu piston, cu o față sau cu ambele fețe active, cu piston și sertăraș etc. Trebuie precizat că, în general nu sînt folosite elemente de execuție hidraulice cu motoare hidraulice rotative.

Elementele de execuție hidraulice folosesc deci motoare hidraulice liniare avînd cursa pistonului de 5 — 10 cm și acolo unde sînt necesare forțe mari ca de exemplu la comanda întreruptoarelor și separatoarelor electrice, la comanda vanelor etc.

D. ELEMENTE DE EXECUȚIE PNEUMATICE

Elementele de execuție pneumatice folosesc motoare de acționare pneumatice liniare (cu membrană, cu piston etc.).

Organele comandate sînt în principiu aceleași ca cele descrise mai sus și anume: vane, diverse întreruptoare și separatoare electrice etc. Folosirea elementelor de execuție pneumatice este oportună atunci cînd forțele de acționare sînt relativ mici, iar viteza necesară de execuție a manevrei este mare. Elementele de execuție pneumatice sînt însă foarte necesare atunci cînd ele funcționează în mediu exploziv sau cu pericol de incendiu.

E. ELEMENTE DE EXECUȚIE MIXTE

Aceste tipuri de elemente cuprind motoare de execuție de o structură compusă (mixtă), utilizînd două din tipurile de acționări cunoscute. Astfel, se disting motoare de execuție electrohidraulice, hidropneumatice etc. Aceste tipuri de motoare au apărut din necesitatea de combinare a avantajelor fiecărui tip în parte. De exemplu, dacă se dorește un motor de execuție cu o forță mare de acționare, calitate care aparține acționării hidraulice însă sistemul fiind unic pe întreaga instalație nu este justificată din punct de vedere economic prevederea unei surse speciale de energie hidraulică (ulei sub presiune), se adoptă soluția cu motor de execuție electrohidraulic arătat schematic în figura 18.6.

Curentul de comandă I_c produce funcționarea motorului electric M care antrenează generatorul (pompa) de ulei P. În acest mod uleiul este pompat în servomotorul hidraulic H din spațiul A în spațiul B deplasînd tija T spre dreapta și acționînd astfel asupra unui organ de execuție cu mișcare liniară. Dacă curentul I_c își schimbă sensul, acționarea va avea loc în sens invers, pompa P fiind reversibilă. Limitatorul L plasat pe tija T deschide la fine de cursă contactul C_1 sau C_2 întrerupînd curentul I_c. Întregul ansamblu motor electric — pompă — motor hidraulic constituie un tot unitar: *motor electrohidraulic*.

Tot în categoria elementelor de execuție mixte se încadrează și dispozitivul *MOP* de acționare a întrerupătoarelor de înaltă tensiune I.O 110—400 kV

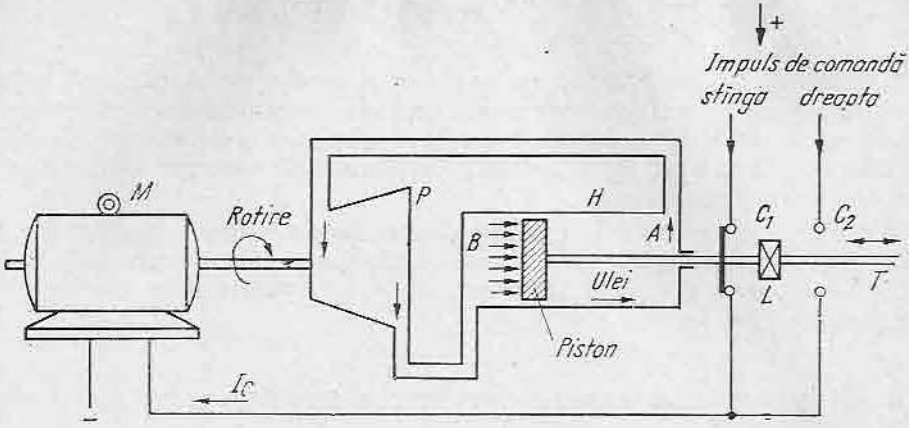


Fig. 18.6. Motor de execuție electrohidraulic.

fabricate la Întreprinderea Electroputere — Craiova. După cum s-a arătat în capitolul 17, acest dispozitiv reprezintă un motor de execuție oleopneumatic, de fapt *hidropneumatic*.

REZUMAT

● Elementele de execuție sînt acele părți ale instalației tehnologice prin care se intervine pentru a modifica parametrii din proces.

● Organul de execuție face parte integrantă din instalația tehnologică, însă motorul de execuție trebuie prevăzut în mod obligatoriu în cazul comenzilor de la distanță sau în cazul introducerii automatizării.

● În funcție de tipul motorului, respectiv al agentului energetic de acționare, elementele de execuție se clasifică în: electrice, hidraulice, pneumatice și mixte.

● În funcție de organul de execuție elementele de execuție servesc pentru modificarea cantității de substanță (ventile, vane etc.) sau pentru modificarea cantității de energie electrică (reostate, întreruptoare etc.)

VERIFICAREA CUNOȘTINȚELOR

1. Funcția elementului de execuție este de:

a) a executa comenzile primite de la instalația tehnologică?

b) a modifica valoarea parametrilor din proces?

c) a transforma o formă de energie (de exemplu electrică) în altă formă de energie (de exemplu hidraulică)?

2) Motorul de execuție reprezintă:

a) o parte constitutivă a elementului de execuție?

b) o parte constitutivă a instalației tehnologice?

c) un organ de execuție căruia i s-a adăugat un element de execuție?

3. Organul de execuție este absolut necesar la orice instalație tehnologică:
   a) numai la introducerea automatizării?
   b) numai la introducerea telemecanizării?
   c) în orice situație?

4. Elementele de execuție hidraulice se folosesc de obicei:
   a) în instalații (centrale) hidroenergetice?
   b) cînd nu se dispune de energie electrică?
   c) cînd sînt necesare forțe de acționare relativ mari?

5. Elementele de execuție pneumatice se folosesc de obicei:
   a) la instalațiile montate în aer liber?
   b) la instalațiile cu pericol de explozie sau incendii?
   c) la obținerea deplasărilor circulare mari?

Capitolul 19

TELEMECANICA

A. NOȚIUNI GENERALE

În relațiile ce există între om și instalațiile tehnologice care realizează procese de producție au intervenit în decursul timpului o serie de schimbări calitative, caracterizate printr-o reducere treptată a muncii fizice compensată de o creștere corespunzătoare a muncii intelectuale.

Dacă în stadiul inițial omul a cedat instalației tehnologice energia mecanică necesară din însăși forța sa musculară (proces manual), mai tîrziu, prin descoperirea mașinilor cu abur, a motoarelor electrice sau a celor cu ardere internă, instalația tehnologică a primit energia necesară de la motoarele respective (proces mecanizat). În această fază însă, conducerea (dirijarea) procesului concretizată printr-o serie de funcții ca: măsurarea, comanda, reglarea * etc. au continuat să rămînă în sarcina omului („operator uman").

Un salt substanțial a fost înregistrat în realizarea proceselor de producție prin introducerea automatizării (proces automat), situație în care funcția de conducere a procesului a fost preluată de „dispozitive automate". A apărut astfel: măsurarea automată, comanda automată, reglarea automată etc.

În sfîrșit, există situații în care o serie de instalații tehnologice, repartizate geografic pe suprafețe mari, pot lucra într-o legătură funcțională de interdependență constituind o instalație complexă. De exemplu, sistemul energetic național reprezintă un caz tipic de instalație complexă cuprinzînd centrale termo- și hidroelectrice, linii de transport și stații de transformare de pe întregul teritoriu al țării. După cum se știe, aceste elemente constitutive funcționează într-o relație de strînsă interdependență. Pentru a se realiza o conducere centralizată care să asigure funcționarea în condiții optime a instalației în ansamblul ei este necesar ca informațiile privind desfășurarea procesului (măsură, semnalizare etc.) precum și deciziile de conducere (comandă, reglare etc.) să fie primite, respectiv date de către un organ central numit dispecer (în exemplul dat *dispecerul energetic național*). Din punctul de dispecer se poate „acționa la distanță" asupra elementelor principale ale fiecărei instalații în parte, respectiv asupra parametrilor din proces. Această acționare la distanță reprezintă *telemecanizarea* instalațiilor respective (tele = = distanță) iar disciplina care se ocupă de telemecanizarea instalațiilor tehnologice se numește *telemecanică*.

Telemecanizarea unor instalații tehnologice presupune o automatizare completă a obiectivului respectiv, după cum telemecanizarea însăși reprezintă

---

* Se reamintește că:

MĂSURAREA reprezintă informarea cu caracter cantitativ asupra mărimilor (parametrilor) din proces. Prin măsurare se asigură, de exemplu, determinarea valorilor presiunii, temperaturii, puterii, debitului etc. sensul semnalului fiind bineînțeles de la instalația tehnologică către un punct de supraveghere;

COMANDA reprezintă acțiunea cu caracter cantitativ sau calitativ asupra stării sau poziției unor organe din instalația tehnologică; de exemplu deschiderea-închiderea unor vane, a unor întreruptoare etc.

REGLAREA reprezintă comanda unor elemente din instalație deci modificarea valorilor unor mărimi în scopul menținerii acestora la anumite valori prescrise („valoare de consemn"); de exemplu menținerea la o valoare constantă a tensiunii unui generator.

o condiție prealabilă a „cibernetizării" instalației complexe, adică a conducerii sale cu ajutorul calculatoarelor electronice.

Necesitatea prevederii telemecanizării este justificată în anumite cazuri speciale dictate de specificul unor procese de producție. Astfel:

● **Procese de producție complexe** în care părțile constitutive, respectiv instalațiile tehnologice, deși legate funcțional între ele, sînt situate la distanțe mari. În această situație, o funcționare necoordonată este neeconomică, deci nerațională. În această categorie se includ: sistemele de producere, transport, distribuție și utilizare a energiei electrice (sistemele energetice) sistemele de irigație a terenurilor agricole, cîmpurile de sonde, rețelele de transport și distribuție a gazelor naturale etc.

● **Procese de producție periculoase,** la care conducerea de la distanță se impune din considerente de protecție a muncii cum sînt de exemplu procesele la mari adîncimi (în foraj-extracție), la temperaturi ridicate sau scăzute, în mediu radioactiv, la reactoare atomice etc.

● **Procese de producție care necesită siguranță mare** și a căror telemecanizare oferă o desfășurare mai operativă. În această categorie intră dirijarea circulației feroviare a traficului rutier sau aerian etc.

● **Procese de producție imposibil de realizat fără telemecanizare** cum sînt de pildă zborurile rachetelor cosmice interplanetare, a sateliților etc.

Observație. Dacă în cazurile precedente introducerea sistemelor de calcul (cibernetizarea) la obiectele telemecanizate constituie o măsură de îmbunătățire (optimizare) a funcționării acestora, în cazul zborurilor rachetelor sau sateliților dirijarea este imposibilă fără calculatoare.

B. FUNCȚIUNILE ȘI STRUCTURA SISTEMELOR TELEMECANICE

Funcțiunile din automatică: măsurare, comandă, semnalizare, reglare etc. sînt întîlnite și în telemecanică cu observația că în acest caz ele se efectuează „la distanță": *telemăsurare, telecomandă, telesemnalizare, telereglare* etc.

Telemecanica permite deci realizarea următoarelor funcțiuni:

— *telemăsurarea,* adică transmiterea la distanță a rezultatelor unei măsurări (de exemplu, telemăsurarea valorii tensiunii sau debitului);

— *telecomanda,* adică transmiterea la distanță a unei comenzi (de exemplu, telecomanda pornirii sau opririi unui agregat);

— *telesemnalizarea,* adică transmiterea la distanță a unui semnal (de exemplu, telesemnalizarea unei avarii, telesemnalizarea depășirii unor limite, a poziției închis sau deschis a unui întrerupător etc.);

— *telereglarea,* cînd instalația de telemecanică permite realizarea unei reglări la distanță (de exemplu, telereglarea puterii unor centrale electrice). După cum s-a arătat, telemecanica are o foarte largă utilizare în sistemele energetice actuale, care sînt alcătuite din numeroase centrale electrice și stații electrice interconectate, adesea situate la distanțe mari una de alta.

Pentru asigurarea producerii și distribuției raționale a energiei electrice, deci pentru buna funcționare a sistemelor energetice, este necesar să se centralizeze într-un punct de comandă (punct de dispecer) controlul și comanda întregului sistem.

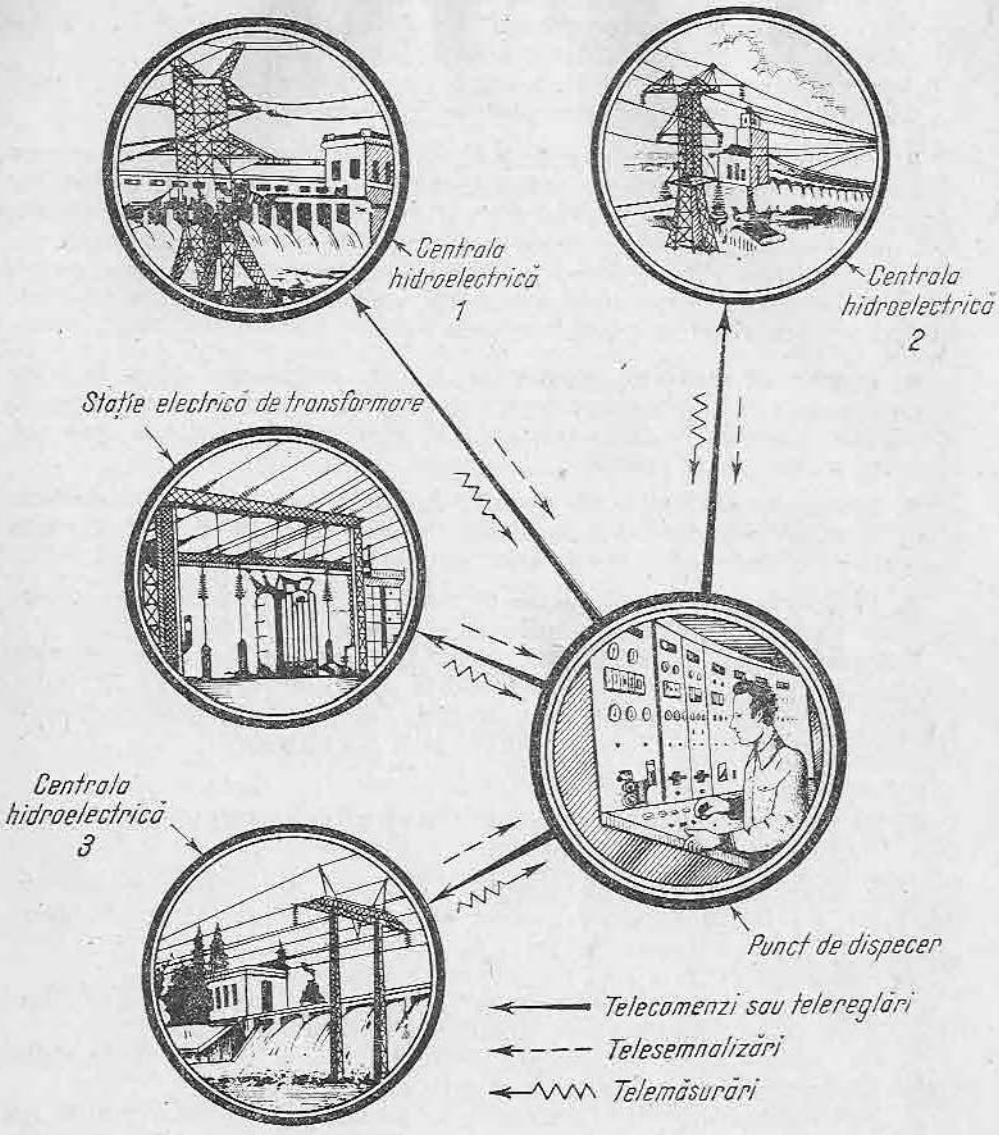


Fig. 19.1. Conducerea prin telemecanizare a unui sistem energetic.

Punctul de dispecer este echipat cu instalații telemecanice speciale pentru măsurarea de la distanță a anumitor mărimi (electrice sau neelectrice) în diverse puncte ale sistemului energetic, pentru comanda de la distanță a aparatajului și instalațiilor principale și pentru semnalizarea situației acestora la punctul central de comandă.

În figura 19.1 este arătată principial conducerea prin telemecanizare a unui sistem energetic de la un punct de dispecer.

Legătura dintre punctul de dispecer (fig. 19.2) și instalațiile controlate sau comandate prin mijloace telemecanice se realizează pe cale electrică,

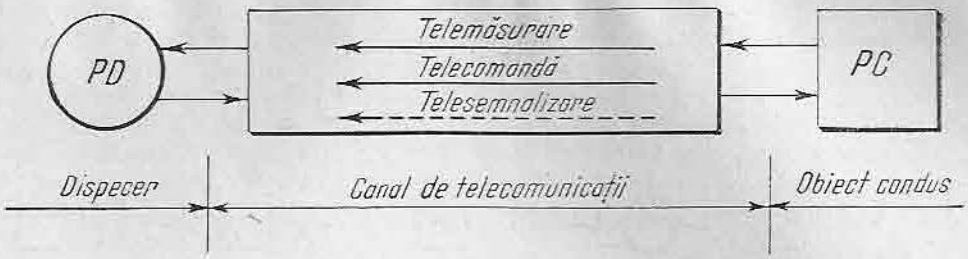


Fig. 19.2. Legătura „dispecer-obiect telemecanizat".

printr-o *linie de telecomunicație* (numită și *canal de telemecanică*). Această legătură se poate realiza, fie prin conductoare electrice (linie de telecomunicație prin fire), fie fără conductoare de legătură (canal de telemecanică prin radio).

La rîndul lor, liniile sau canalele de telemecanică prin fire pot fi:

— *circuite fizice propriu-zise* (de exemplu, o linie bifilară, prin care trece semnalul de telemecanică, fără a fi supus la transformări intermediare pe parcursul dispecer-obiect telemecanizat);

— *canale de curenți purtători pe circuite fizice*, care asigură transmiterea concomitentă în linie a mai multor semnale sinusoidale „purtătoare", fiecare din acestea fiind „modulat" în amplitudine sau frecvență de semnalele telemecanice (de exemplu, semnale telemecanice care cuprind în spectru frecvențe pînă la 80 Hz modulează 24 semnale „subpurtătoare" cuprinse între 400 și 3 200 Hz; acestea modulează, la rîndul lor, o purtătoare de zeci sau sute de kiloherți, rezultînd o modulație în două trepte).

Deoarece circuitele fizice reprezintă investiții mari și nu permit transmiterea mai multor semnale telemecanice concomitent, devine neeconomică utilizarea lor pentru conducerea de la distanță a unor procese complexe. Canalele de curenți purtători (ca și canalele radio) sînt preferate și utilizarea lor s-a impus din ce în ce mai mult. Un argument în plus: curenții purtători pot fi transmiși și pe liniile de înaltă tensiune de transport și distribuție a energiei electrice, linii care sînt gata construite și se întind pe întreg cuprinsul țării.

Orice sistem de telemecanică este alcătuit din cel puțin două subansamble sau terminale — cel de la postul de dispecer și cel (sau cele) de la postul (sau posturile) comandat la distanță, legate între ele prin canale de telecomunicație (sau de telemecanică).

În cazul în care se transmite numai informația de control (telesemnalizarea sau telemăsurarea), postul controlat reprezintă totodată postul de emisie a semnalelor iar postul de comandă (sau dispecer) — postul de recepție. Dacă se transmite numai informația de comandă, emițătorul se află la postul de comandă (sau dispecer) iar receptorul (sau receptoarele) la postul comandat.

În situația în care se prevede atît transmiterea de informații de control cît și de informații de comandă, ambele terminale trebuie să conțină atît emițătorul cît și receptorul de semnale telemecanice.

În funcție de modul diferit de amplasare a obiectelor telemecanizate în raport cu punctul de dispecer, structura rețelei de canale de telecomunicație variază. Se deosebesc astfel:

— *structuri telemecanice cu obiecte concentrate* (fig. 19.3,*a*), în cazul în care obiectele (sau posturile) controlate *PC* sînt amplasate teritorial la mică dis-

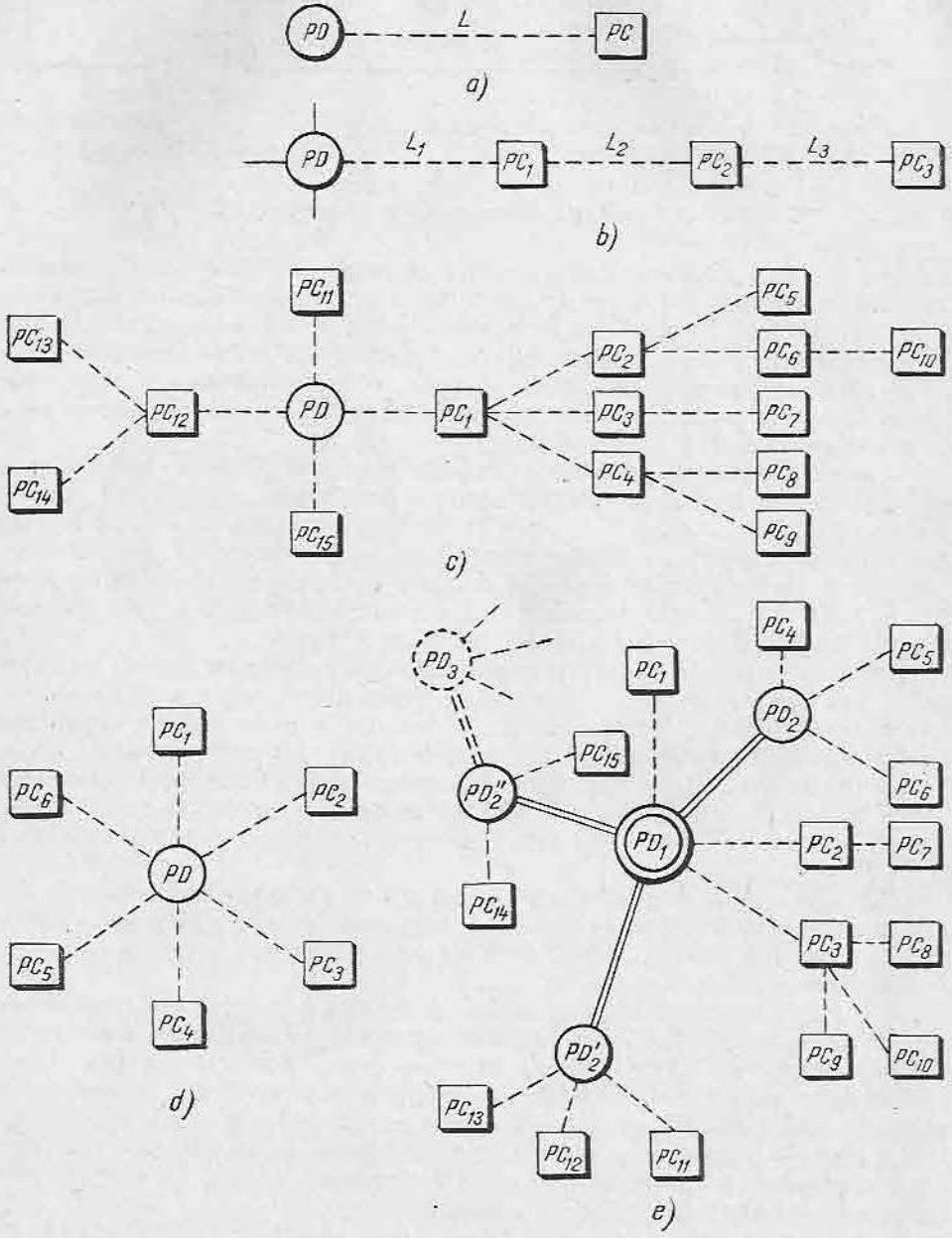


Fig. 19.3. Structuri telemecanice tip:

a — cu obiecte concentrate; *b* — cu obiecte dispersate liniar; *c* — cu obiecte dispersate arborescent; *d* — cu obiecte dispersate radial; *e* — cu puncte de dispecer ierarhizate (în trepte).

tanță de postul de dispecer PD, astfel încît se poate utiliza o aparatură de telemecanică, cu două terminale (de exemplu, telemecanizarea obiectelor din centrale electrice, stații de transformare etc.);

— *structuri telemecanice cu obiecte dispersate*, în cazul în care distanțele între posturile controlate sau comandate sînt mari și necesită legături telemecanice distincte cu postul de dispecer. După modul de amplasare a obiectelor telemecanizate se disting: *structuri telemecanice cu obiecte dispersate liniar* (fig. 19.3, *b*), *cu obiecte dispersate arborescent* (fig. 19.3, *c*) și *cu obiecte dispersate radial* (fig. 19.3, *d*).

Unele structuri mai complexe prezintă grupe concentrate de obiecte telemecanizate care sînt amplasate dispersat (așa-numitele structuri cu obiecte dispersat-concentrate).

Structurile telemecanice cu obiecte dispersate se întîlnesc frecvent ca de exemplu, cazul cîmpurilor de sonde telemecanizate, a rețelelor de irigații, de transport și distribuție a gazelor naturale, telemecanizarea transporturilor feroviare etc.

În sfîrșit, în cazul cel mai general, organizarea prin puncte de dispecer a sistemelor telemecanice poate fi *ierarhizată*. Această ierarhizare poate fi realizată într-una, două sau chiar mai multe *trepte*. Astfel, de exemplu, în figura 19.3, *e* este prevăzut un *punct de dispecer central* (național) PD_1, care are subordonate punctele de *dispecer regional* PD_2, PD_2' PD_2''... Punctul de dispecer central mai poate avea în „conducere operativă" și unele obiecte ca de pildă PC_1, PC_2 și PC_3 care prezintă o pondere mare și deci o importanță deosebită în structura de ansamblu.

Dispecerele regionale PD_2 au în subordinea lor diverse obiecte comandate (dirijate) de exemplu PC_4, PC_5... însă libertatea lor de acțiune este limitată. De exemplu, considerînd sistemul energetic național, un *dispecer regional* poate manevra în diverse moduri centralele și stațiile electrice din subordinea sa însă este obligat să asigure cu sistemul respectiv anumite performanțe impuse de *dispecerul energetic național*. Aceste performanțe pot fi, de exemplu: respectarea unei curbe de sarcină* sau a unui nivel de tensiune pe bara unei stații de transformare etc.

Observație. Dacă necesitățile o cer, un sistem telemecanic poate cuprinde și o a treia treaptă de dispecer (de exemplu dispecer local PD_3 — fig. 19.3,*e*) care este subordonat dispecerului din treapta a 2-a (PD_2'') ș.a.m.d.

În ultimii ani au fost realizate instalații telemecanice electronice, cu comutație statică. La construcția echipamentelor moderne de telemecanizare sînt folosite tot mai mult dispozitivele cu tranzistoare și cu miezuri de ferită, cu distribuitoare electronice (cu fascicul liniar sau radial) și cu semiconductoare, circuitele integrate etc.

În țara noastră, Întreprinderea pentru raționalizarea și modernizarea instalațiilor energetice (ICEMENERG) și IEA fabrică unele elemente și instalații de telemecanizare.

Astfel, se pot cita: echipamentul pentru automatizarea centralelor hidroelectrice (cuprinde: dispozitive pentru convertirea, memorizarea și repartizarea automată a consemnului de putere activă sau reactivă, dispozitive pentru reglarea automată a excitației generatoarelor, pentru reglarea automată a nivelului în bazinele de liniștire, pentru pornirea sau oprirea automată a turbinelor etc.); echipamentele de telemecanică cu elemnte statice (variantele:

* Sarcina (puterea) pe care trebuie să o debiteze o centrală electrică în fiecare moment.

"TELECIC" — pentru *telesemnalizare ciclică*, "TELECIN" — pentru telesemnalizare și telemăsurare ciclică numerică, "TELESTAT" — pentru telecomandă la cerere, telesemnalizare și telemăsurare ciclică numerică etc.); echipamente de telemecanică cu tranzistoare și circuite integrate pentru conducte de gaz metan, pentru stații de cale ferată electrificate etc. (concepute la IPA).

C. CERINȚE IMPUSE APARATURII DE TELEMECANICĂ

În realizarea aparaturii de telemecanică se ridică o serie de probleme, diferite în funcție de destinația aparaturii respective, dar de a căror rezolvare depinde esențial soluția tehnică adoptată și eficiența instalației, proiectată și realizată.

Dintre aceste probleme se amintesc:

● **Problema stabilității la perturbații.** În unele cazuri, perturbațiile din canalul de telecomuncație pot să fie foarte puternice și intense, deformînd semnalul de telemecanică. De aceea, la recepționarea semnalelor trebuie să se ia măsuri speciale pentru a se distinge semnalul util din semnalul total recepționat (compus din semnalul util și perturbații).

Se evită totodată posibilitatea ca un anumit semnal de telemecanică, transmis de la punctul de comandă, să fie transformat, sub acțiunea perturbațiilor într-un alt semnal, executîndu-se o altă comandă decît cea transmisă sau înregistrîndu-se pe aparatele de măsurare și înregistrare o altă valoare decît cea transmisă de la obiectul telemecanizat.

În unele sisteme de telemecanică, de fabricație modernă, semnalul odată transmis este memorizat la postul de recepție și fără a fi executată comanda este retransmis înapoi la postul care l-a emis. Acolo, acesta este comparat cu semnalul inițial și, în cazul în care nu se constată o deformare sensibilă a semnalului, se transmite automat un ordin de acceptare a execuției comenzii date. În cazurile în care semnalul a fost perturbat și este deformat sensibil, se emite un ordin de blocare a execuției comenzii date anterior, care anulează memorizarea acesteia și ciclul de funcționare se reia de la început.

● **Problema fiabilității** (siguranței în funcționare). Se cere tot mai mult ca aparatura de telemecanică să fie sigură în funcționare, să se defecteze cît mai rar posibil.

În cazul defectării aparaturii de telemecanică, aceasta trebuie să permită o localizare rapidă a defectului și o remediere care să poată fi efectuată de către personalul de întreținere, în cele mai multe situații.

Pentru ca defectarea aparaturii de telemecanică de la unul din terminale să nu provoace transformarea comenzilor în comenzi false, se procedează la blocarea automată a instalației, avertizarea postului de dispecer și — uneori — la conectarea automată a unei instalații de rezervă, în stare de funcționare.

● **Problema economicității aparaturii de telemecanică.** Fără a se renunța la nivelul tehnic, la precizia și siguranța aparaturii de telemecanică, se urmărește asigurarea unor costuri reduse prin economia de canale de telemecanică care trebuie realizate, prin evitarea rezervelor care nu sînt absolut necesare, prin raționalizarea schemelor adoptate etc.

REZUMAT

Telemecanica reprezintă totalitatea mijloacelor tehnice prin care se asigură transmiterea la distanță a unei informații (a unei măsurări, a unei comenzi sau a unei semnalizări).

Telemecanica cuprinde următoarele ramuri: *telemăsurarea, telecomanda, telesemnalizarea* și *telereglarea.*

Legătura dintre punctul de comandă (sau dispecer) și instalațiile (obiectele) controlate sau comandate prin mijloace telemecanice se realizează pe cale electrică, printr-o *linie de telecomunicație* (numită și *canal de telemecanică*).

Sistemele de telemăsurare cu acțiune la distanțe mici (sisteme de putere) se realizează fie pe bază de curent fie de tensiune.

Sistemele de telemăsurare cu acțiune la distanțe mari se realizează fie ca *sisteme cu impulsuri*, fie ca *sisteme de frecvență.*

La sistemele cu impulsuri, funcționarea dispozitivelor de telemăsurare se poate baza pe numărul impulsurilor, pe durata impulsurilor, pe frecvența impulsurilor sau pe o anumită codificare a impulsurilor.

Principalele cerințe impuse aparaturii de telemecanică sînt: stabilitatea la perturbații, fiabilitatea instalațiilor (siguranța în funcționare) și economicitatea sa.

VERIFICAREA CUNOȘTINȚELOR

1. Ce este telesemnalizarea:
   a) transmiterea la distanță a unui curent?
   b) transmiterea la distanță a unei informații calitative?
   c) transmiterea la distanță a rezultatelor unei măsurări?
2. Cum se realizează legătura între postul de comandă (sau dispecer) și posturile telemecanizate:
   a) pe cale electrică, printr-o linie de telecomunicație (cu fir sau prin radio)?
   b) prin cuplaj magnetic?
   c) prin semnale luminoase, de intensitate variabilă?
3. Ierarhizarea în telemecanizarea unui sistem reprezintă:
   a) introducerea telemăsurării ciclice?
   b) prevederea mai multor puncte de dispecer?
   c) telesemnalizarea numai de la obiectele apropiate?
4. Telemăsurarea ciclică reprezintă:
   a) o măsurare continuă?
   b) o măsurare discontinuă?
   c) o măsurare la cerere?

Capitolul 9

1. Se determină un punct la intersecția dintre curentul de pornire 660 A (pe abscisă) și timpul de pornire 8 s (pe ordonată), considerîndu-se valoarea fuzibilelor de pe curba superior apropiată. Fuzibilul ales este pentru 200 A.

2. Protecție la scurtcircuit, termică și de tensiune minimă.

3. b; 4. c; 5. b; 6. Prin modul de acționare: manual, respectiv printr-un ax al reductorului acționării; 7. De căderea de tensiune pe sarcină; 8. Robustețe, nu necesită întreținere și supraveghere, circuite separate galvanic; 9. Comportare dinamică, gabarit, posibilități de reglare; 10. Excitronul are excitație continuă; 11. Prin numărul joncțiunilor.

Capitolul 10:

1. b; 2. a; 3. a; 4. a; 5. c; 6. $\sim$ 0,1 Nms^2; 4 Nm^2; 7. $i_{pq} = \frac{\omega_p}{\omega_q}$;

8. $\eta_{1n} = \frac{P_n}{P_1} = \eta_{12} \cdot \eta_{23} \cdots \eta_{(n-1)n}$

9. 0,4 Nm^2; 10. Momentul de volant raportat al lingoului

$$GD_l^2 = G_L \cdot D_r \left(\frac{n_4}{n_1}\right)^2 = 10 \text{ Nm}^2.$$

Momentul de volant al transmisiei

$$GD_t^2 = 20 + 2\,000 \left(\frac{100}{500}\right)^2 + 1\,500 \left(\frac{75}{500}\right)^2 + 3\,000 \left(\frac{150}{500}\right)^2 = 400 \text{ Nm}^2$$

Momentul de volant total este 410 Nm^2

Capitolul 11:

1. c

Capitolul 12

1: modificarea parametrilor electrici și magnetici, scheme cu elemente combinate; 2: $\nu\% = \frac{500}{1000} \cdot 100 = 50\%$; 3: *b*; 4: 0,105; 5: *a*; 6: *a*; 7: *c*; 8: monozonal spre viteze inferioare, finețe redusă, cuplu nominal constant; 9: 220 V; 10: grafică, analitică; 11: manual (controler); automat (în funcție de timp sau de curent); 12: nu! deoarece se arde; este necesar un reostat de pornire și reglare; 13: $U = E + RI_a$; 14: *a*; 15: în direcția și prin depășirea vitezei de mers în gol; 16: $n = n_0 + \frac{R}{C_e \cdot C_m} M$; 17: dinamică; motorul

este deconectat de la rețea; 18: *a*; 19: curba proporțională cu cea de magnetizare $\Phi = f(I)$; 20: familii de caracteristici exprimate în valori relative pentru caracterizarea legăturii între parametrii μ(cupluri), ν (viteze), i (curent, η (randament) etc.; 21: *b*; 22: *a* și *b*; 23: *b*; 24: zero; 25: *c*; 26: la $M \to 0$, $n \to \infty$, motorul se ambalează; 27: variații mici de sarcină produc variații mari de viteză; 28: cu autoexcitație și cu excitație independentă; 29: mai folosit *b*, dar posibil și *a*; 30: cupluri mari la pornire, respectiv posibilitatea frînării recuperative; 31: 30 ... 40; 32: motorul asincron și excitatoarea-generator; generatorul motor; motorul-generator; 33: prin inversarea polarității excitației; 34: diferența între viteza de sincronism și viteza rotorului, raportată la viteza de sincronism; motor-pozitivă, generator-negativă; 35: cuplul maxim în timpul pornirii și alunecarea corespunzătoare; 36: motorul nu pornește, iar înfășurările sînt parcurse de curenți mari; 37: rezistența rotorică, tensiunea și frecvența de alimentare; 38: avantaje: M_k constant, M_p crește; dezavantaje: scade stabilitatea; 39: dezavantaje: scade M_k și M_p și deci scade stabilitatea; 40: avantaje: se menține stabilitatea; dezavantaje: variază M_k și M_p; 41: segmentele determinate de caracteristici pe dreapta $M = M_M$ sînt proporționale cu rezistențele treptelor; 42: cu rezistențe rotorice, cu comutator stea-triunghi, cu rezistențe statorice, cu bobine de reactanță, cu autotransformator; 43: la mecanismele care înmagazinează energie potențială, în timpul coborîrii se depășește viteza de sincronism și motorul trece în regim generator; 44: la frînare dinamică se anulează odată cu turația, la contracurent își menține o valoare importantă chiar cînd turația e zero; 45: contraconectare prin inversarea sensului de rotație a rotorului în raport cu cîmpul învîrtitor sau prin inversarea sensului de rotație a cîmpului în raport cu rotorul; 46: varierea rezistențelor rotorice, varierea combinată a tensiunii și frecvenței de alimentare, schimbarea numărului de poli; 47: cînd cuplul depășește aceste valori, mașina iese din sincronism; 48: o componentă sinusoidală cu perioada dublă (sin 2θ); 49: se decuplează statorul de la rețea, se cuplează pe o rezistență de frînare trifazată și se menține rotorul excitat.

Capitolul 13

1: efecte: întîrzie punerea în mișcare a sistemului, crește curentul absorbit de motor și cuplul, se încălzesc mai mult decît în funcționare normală înfășurările și fierul mașinii; 2: timpii morți în funcționare, accelerațiile și decelerațiile inadmisibile, șocurile prea mari de curent și cuplu, încălzirea exagerată;

3. $C'_m i = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} + M_r$;

$U = C'_e n + Ri$ — nu se ține seama de regimul tranzitoriu electromagnetic;

$U = C'_e n + L_a \frac{di}{dt} + Ri$ — se ține seama de regimul tranzitoriu electromagnetic;

$U = C_e \alpha i n + R_a i$;

4: în cazul motoarelor de curent continuu factori electrici (rezistența de pornire sau frînare și constanta C'_e) și mecanici (GD^2 și constanta C'_m). Se poa-

te influența asupra constantei electromecanice prin alegerea unei rezistențe de pornire sau frînare corespunzătoare, dar și prin dimensionarea corespunzătoare a mașinii și utilajului; în cazul motoarelor asincrone și sincrone cu pornire în asincron depinde de GD^2 și n_0, care sînt caracteristici constructive ale mașinii și utilajului și de cuplul maxim M_k care poate fi influențat prin variația tensiunii de alimentare și frecvenței;

5. $U = i_1 R_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + L_{1,2} \frac{di_2}{dt}$;

$$0 = i_2 R_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + L_{2,1} \frac{di_1}{dt};$$

$$M = M_r - M_a = 0.$$

$i_1 R_1$ și $i_2 R_2$ reprezintă căderile ohmice de tensiune în înfășurările statorice și rotorice;

$L_1 \frac{di_1}{dt}$ și $L_2 \frac{di_2}{dt}$ reprezintă căderile de tensiune în timpul procesului tranzitoriu în înfășurările statorice și rotorice, datorită propriilor reactanțe;

$L_{1,2} \frac{di_1}{dt}$ și $L_{2,1} \frac{di_1}{dt}$ reprezintă căderile de tensiune din timpul procesului tranzitoriu datorită reactanțelor mutuale.

Capitolul 14

1.b; 2.b; 3.b; 4.266 cal.; 5. b; 6. b; 7. 63,7 Nm; 8. 22,3 Nm; 9. 7,2 kW; 10. 7,2 Nm; 11. a; 12.a; 13. 360; 14. b; 15. 16 kW; 16. b; 17. b; 18. a.

Capitolul 16

1. Dau șocuri mari de curent în rețea.

2. Pornire directă și pornire cu rezistențe de pornire în funcție de turație, timp, curent.

3. Frînarea dinamică este în cazul motoarelor asincrone o trecere în regim de generator sincron cu inductorul fix, iar în cazul motoarelor de curent continuu, o trecere în regim de generator de curent continuu. În ambele cazuri, generatorul debitează pe o rezistență de frînare.

4. Schimbarea a două faze ale statorului la motorul asincron, sau schimbarea polarității indusului la motorul de curent continuu. Rezistențele de frînare servesc pentru limitarea curentului.

5. Se va explica fiecare figură în parte.

6. Vezi figura 16.23.

7. Vezi figura 16.24.

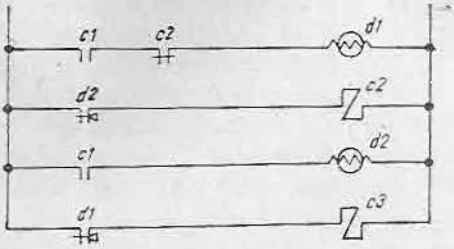


Fig. 16.23.

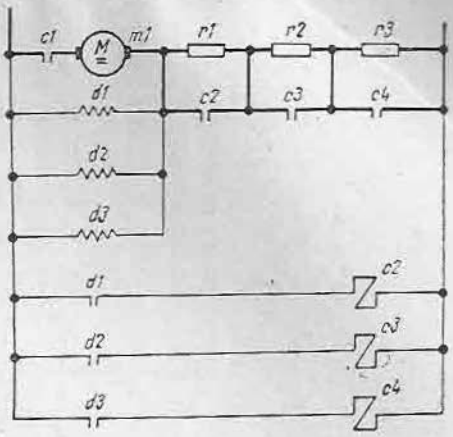


Fig. 16.24.

8. Dispozitivele de aprindere produc impulsuri pentru comanda grilei și le decalează cu unghiuri α, pentru obținerea unui curent mediu redresat variabil.

9. În regimul de redresare necomandat, elementele redresoare nu au grile de comandă și aprinderea se face în momentul apariției unei tensiuni anodice pozitive (unghiul $\alpha = 0$).

10. În regimul de redresare comandat se aplică impulsuri pozitive pe grilele de comandă pentru stabilirea unui unghi de comandă $\alpha \neq 0$ și a unui curent mediu redresat variabil.

11. Bobina de absorbție preia diferența de tensiune din punctele mediane ale celor două sisteme trifazate, datorată diferențelor de tensiune la bornele elementelor redresoare.

12. Conexiunea în punte trifazată asigură o solicitare de tensiune mai mică a elementului redresor.

13. Cu rezistențe de pornire, cu autotransformator de pornire.

14. La motorul în scurtcircuit se deconectează statorul de la rețea și se cuplează la o sursă de curent continuu. La motorul cu inele se procedează la fel și rotorul se conectează pe o rezistență de frînare.

15. Se inversează două faze ale statorului și se introduc rezistențele de frînare; la motorul în scurtcircuit în stator, la motorul cu inele în rotor.

16. Releu de timp pentru frînarea dinamică, relee de turație și de curent pentru frînarea prin cuplare inversă.

17. Se cuplează statorul la rețea și cînd se ajunge la o turație apropiată de turația sincronă, se excită. Se utilizează la puteri mici pentru motoare cu pornire în asincron.

18. Înfășurările statorice se alimentează la început cu tensiune redusă și apoi la tensiunea nominală. Rotorul se excită fie înainte, fie după cuplarea statorului la tensiunea nominală, în una sau două trepte.

19. Cuplul de sincronizare este mic.

20. Cuplul de sincronizare este mic.

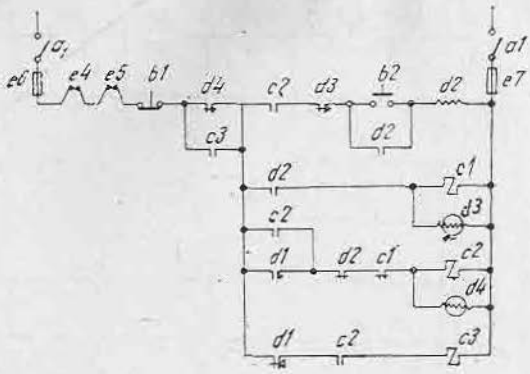


Fig. 16.25.

21. Releul de succesiune a alternanțelor rotorice urmărește curentul alternativ indus în înfășurarea rotorică în timpul pornirii. Cînd alternanțele pozitive devin mai rare și au amplitudine mai mică, releul decuplează.

22. Urmărește tensiunea indusă în timpul pornirii. Cît timp tensiunea e mare, bobina de blocare nu permite bobinei active să pună în mișcare mecanismul de ceasornic. Cînd tensiunea scade, mecanismul se deblochează și bobina activă îl pune în mișcare.

23. Vezi figura 16.25.

24. Se deconectează statorul de la rețea și se conectează pe o rezistență exterioară trifazată, iar rotorul se excită la maximum. Controlul frînării se face în funcție de timp.

Capitolul 17

1. b; 2. b; 3. c; 4. c.

Capitolul 18

1. b; 2. a; 3. c; 4. c; 5. b

Capitolul 19

1. b; 2. a; 3. b; 4. a.

$$\mathcal{E}_1 = -\dot{\Phi} - n$$

$$\mathcal{E}_1 = \frac{-n \cdot \Delta\Phi}{\Delta t}$$

CUPRINS

Partea întîi

MAŞINI ELECTRICE

Cap. 1. Calculul circuitelor de curent continuu 4
Cap. 2. Calculul circuitelor de curent alternativ 21
Cap. 3. Maşini electrice de curent continuu 51
Cap. 4. Transformatoare electrice 83
Cap. 5. Înfăşurările statorului maşinilor de curent alternativ 109
Cap. 6. Cîmpurile magnetice învîrtitoare ale maşinilor de curent alternativ 119
Cap. 7. Maşini electrice asincrone 131
Cap. 8. Maşini electrice sincrone 156

Partea a doua

ACŢIONĂRI

Cap. 9. Aparate pentru acţionări electrice 174
Cap. 10. Cinematica şi dinamica acţionărilor electromagnetice 209
Cap. 11. Caracteristicile mecanice ale maşinilor de lucru 221
Cap. 12. Caracteristicile mecanice ale motoarelor electrice 226
Cap. 13. Regimuri tranzitorii în acţionările electrice 285
Cap. 14. Alegerea motoarelor electrice de acţionare 293
Cap. 15. Acţionări cu grupuri de maşini 315
Cap. 16. Scheme de alimentare şi comandă a acţionărilor electrice 318
Cap. 17. Acţionări hidraulice şi pneumatice 346
Cap. 18. Elemente de execuţie 366
Cap. 19. Telemecanica 374